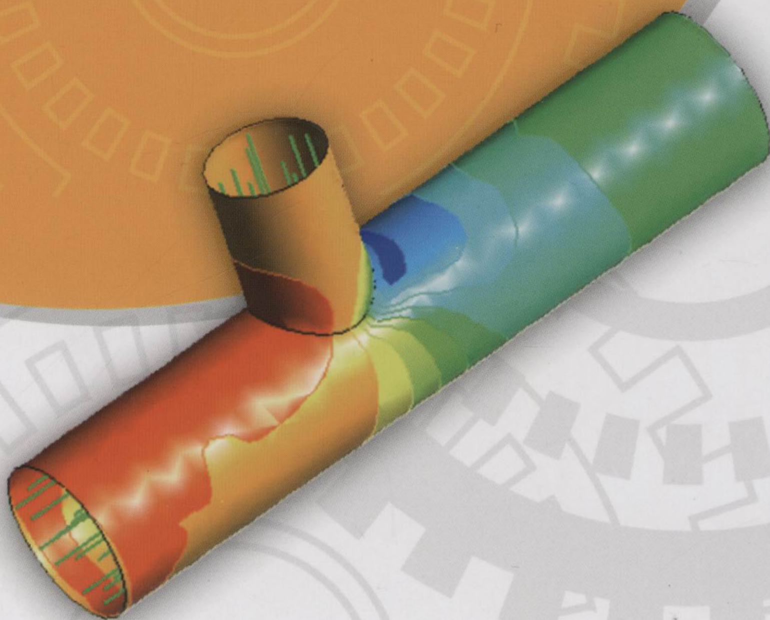
CAD/CAM/CAE

工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练

CAE应用联盟 组编　刘成柱 等编著





关注“机械工业出版社计算机分社”官方微信订阅号，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材模型文件、结果文件和程序代码。





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

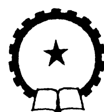
VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练

CAE 应用联盟　组编
刘成柱　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以 ANSYS Workbench 17.0 为操作平台，详细介绍了软件热力学相关的分析功能及应用。本书内容丰富，涉及领域范围广，使读者在掌握软件操作的同时，也能掌握解决相关工程领域实际问题的思路与方法，并能自如地解决本领域所出现的问题。

全书共分 3 篇，基础理论篇从有限元理论着手介绍了热力学分析的基础理论以及 ANSYS Workbench 平台的基础知识；项目范例篇以项目范例为指导，讲解在 Workbench 平台中进行的稳态热分析、非稳态热分析、热辐射分析等内容的理论计算公式与案例实际操作方法；高级应用篇作为传热分析的高级部分，讲解在 Workbench 平台中进行的相变分析、优化分析、热应力耦合分析、热流耦合分析、磁热耦合分析、电磁热耦合分析等内容。

本书工程实例丰富、讲解详尽，内容安排循序渐进、深入浅出，适合不同基础的读者。本书适合理工院校土木工程、机械工程、力学、电气工程等与热学分析有关专业的高年级本科生、研究生及教师使用，同时也可以作为相关工程技术人员从事工程研究的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练 / CAE 应用联盟组编；刘成柱等编著. —北京：机械工业出版社，2017.4（2018.5重印）
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-56727-1

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①C… ②刘… Ⅲ. ①热力学－有限元分析－应用程序
Ⅳ. ①O414.1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 093320 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦　　责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞　　责任印制：孙　炜

保定市中美凯印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版 • 第 2 次印刷
184mm×260mm • 28.5 印张 • 688 千字
3001－4900 册
标准书号：ISBN 978-7-111-56727-1
定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务　　网络服务
服务咨询热线：（010）88361066　　机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：（010）68326294　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
（010）88379203　　教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版　　金 书 网：www.golden-book.com

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

ANSYS 公司的 ANSYS Workbench 作为多物理场及优化分析平台，将在流体市场占据份额较大的两家公司 FLUENT 及 CFX 软件集成起来，同时也将电磁行业分析标准的 ANSOFT 系列软件集成到其平台中，并且提供了软件之间的数据耦合，给用户带来了巨大的便利。

ANSYS Workbench 17.0 提供了 CAD 双向参数链接互动、项目数据自动更新机制、全面的参数管理、无缝集成的优化设计工具等，使 ANSYS 在“仿真驱动产品设计”（Simulation Driven Product Development，SDPD）方面达到了前所未有的高度，同时 ANSYS Workbench 17.0 具有强大的结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析功能，除此之外，自从 ANSYS 17.0 开始，Workbench 平台中的分析界面进行了统一化改进，形成了 ANSYS AIM 分析环境。

1．本书特点

本书以初、中级读者为对象，首先从有限元基本原理及 ANSYS Workbench 使用基础讲起，再辅以 ANSYS Workbench 在工程中的应用案例，帮助读者尽快掌握使用 ANSYS Workbench 进行有限元分析的技能。

本书不仅仅是对软件操作过程的详细讲解，还通过理论与实际操作相结合的方式帮助读者加深对有限元方法的理解。

本书作者结合多年 ANSYS Workbench 使用经验与实际工程应用案例，将 ANSYS Workbench 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

书中的案例是基于作者多年来对热力学有限元分析方法及热学相关理论的深入理解编制而成的；书中的多数案例均给出了解析计算的方法并与有限元算法计算的结果进行了对比。

2．本书内容

本书在必要的理论概述基础上，通过大量典型案例对 ANSYS Workbench 分析平台中的模块进行了详细介绍，并结合实际工程与生活中的常见问题进行详细讲解。全书共分为基础理论篇、项目范例篇、高级应用篇 3 部分内容，具体安排如下。

基础理论篇介绍了有限元理论和 ANSYS Workbench 平台常用命令、几何建模与导入方法、网格划分及网格质量评价方法、结果的后处理操作等方面的内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 1 章：热力学分析的基础理论　　第 2 章：几何建模

第 3 章：网格划分　　第 4 章：边界条件与后处理

项目范例篇介绍了 ANSYS Workbench 平台结构基础分析内容，包括稳态热分析、非稳态热分析、热辐射分析等 4 个方面的内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 5 章：稳态热分析　　第 6 章：非稳态导热分析

第 7 章：非线性热分析　　第 8 章：热辐射分析

高级应用篇介绍了 ANSYS Workbench 平台结构进阶分析功能，主要包括热应力分析、热流分析、热学优化分析等内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 9 章：相变分析　　第 10 章：优化分析

第 11 章：热应力耦合分析　　第 12 章：热流耦合分析
第 13 章：磁热耦合分析　　第 14 章：电磁热流耦合分析

3．附赠网盘内容（详见封底说明）

附赠网盘主要包括案例模型与案例的操作文档，其中案例的模型文件与案例工程文件同放于相关章节的目录中，以方便读者查询。

例如：第 5 章的第二个操作实例“稳态导热案例二——复合层平壁导热”的几何文件和工程项目管理文件放置在“Char05\char05-2\”路径的文件夹下。

4．读者对象

本书适合于 ANSYS Workbench 初学者和期望提高热力学有限元分析及建模仿真工程应用能力的读者，具体包括：

★ 相关从业人员　　★ 初学 ANSYS Workbench 的技术人员
★ 大中专院校的教师和在校生　　★ 相关培训机构的教师和学员
★ 参加工作实习的“菜鸟”　　★ ANSYS Workbench 爱好者
★ 广大科研工作人员　　★ 初、中级 ANSYS Workbench 从业人员

注：其中电磁分析模块（Maxwell）需要读者单独安装，另外本书中部分章节的内容需要安装接口程序。建议使用 ANSYS Workbench 17.0 及以上平台学习本教程。

5．读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，编者会尽快给予解答。

6．本书作者

本书由 CAE 应用联盟组编，主要由刘成柱编写，另外丁金滨、张建伟、丁伟、刘浩、王芳、韩希强、张岩、唐家鹏、石良臣、王菁、郭海霞、李昕、沈再阳、林金宝、高飞、宋玉旺、张文电、张亮亮、于苍海和孙国强也参与了本书的编写工作，在此一并表示感谢。

ANSYS 本身是庞大一个资源库与知识库，本书虽然卷帙浩繁，仍难窥其全貌，加之编者水平有限，书中错误与缺点在所难免，敬请广大读者批评指正，也欢迎广大同行来电来信共同交流探讨。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

编　者

目　　录

出版说明
前言

基础理论篇

第 1 章　热力学分析的基础理论 ······ 1
1.1　传热学概述 ······ 1
1.1.1　传热的基本方式 ······ 2
1.1.2　传热过程 ······ 5
1.2　导热 ······ 7
1.2.1　基本概念及傅里叶定律 ······ 7
1.2.2　导热系数 ······ 10
1.2.3　导热微分方程式 ······ 14
1.2.4　导热的单值性条件 ······ 17
1.3　本章小结 ······ 19
第 2 章　几何建模 ······ 20
2.1　ANSYS Workbench 17.0 平台及模块 ······ 20
2.1.1　Workbench 平台界面 ······ 21
2.1.2　菜单栏 ······ 21
2.1.3　工具栏 ······ 35
2.1.4　工具箱 ······ 35
2.2　DesignModeler 17.0 几何建模 ······ 39
2.2.1　DesignModeler 几何建模平台 ······ 40
2.2.2　菜单栏 ······ 41
2.2.3　工具栏 ······ 51
2.2.4　常用命令栏 ······ 53
2.2.5　Tree Outline（模型树） ······ 53
2.2.6　DesignModeler 几何建模实例——连接板 ······ 56
2.2.7　ANSYS SpaceClaim 同步几何建模实例——连接板 ······ 61
2.3　本章小结 ······ 69
第 3 章　网格划分 ······ 70
3.1　ANSYS Meshing 17.0 网格划分 ······ 70
3.1.1　Meshing 网格划分适用领域 ······ 70
3.1.2　Meshing 网格划分方法 ······ 71
3.1.3　Meshing 网格默认设置 ······ 73
3.1.4　Meshing 网格尺寸设置 ······ 75
3.1.5　Meshing 网格膨胀层设置 ······ 78

3.1.6　Meshing 网格 Patch Conforming 选项……79
3.1.7　Meshing 网格高级选项……80
3.1.8　Meshing 网格损伤设置……80
3.1.9　Meshing 网格评估统计……81
3.2　ANSYS Meshing 网格划分实例……87
3.2.1　应用实例 1——网格尺寸控制……87
3.2.2　应用实例 2——扫掠网格划分……94
3.2.3　应用实例 3——多区域网格划分……98
3.2.4　应用实例 4——网格移动……103
3.3　本章小结……106
第 4 章　边界条件与后处理……107
4.1　ANSYS Workbench 17.0 边界条件……107
4.2　ANSYS Mechanical 17.0 后处理……113
4.2.1　查看结果……113
4.2.2　结果显示……117
4.2.3　温度结果显示……118
4.2.4　用户自定义输出结果……119
4.2.5　后处理结果（2）……120
4.3　案例分析……121
4.3.1　问题描述……121
4.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目……121
4.3.3　导入创建几何体……121
4.3.4　添加材料库……123
4.3.5　添加模型材料属性……125
4.3.6　划分网格……126
4.3.7　施加载荷与约束……126
4.3.8　结果后处理……128
4.3.9　保存与退出……131
4.4　本章小结……132

项目范例篇

第 5 章　稳态热分析……133
5.1　稳态导热……133
5.2　平壁导热理论……133
5.3　稳态导热案例一——单层平壁导热……138
5.3.1　问题描述……138
5.3.2　解析方法计算……138
5.3.3　启动 Workbench 并建立分析项目……138
5.3.4　创建几何体模型……139
5.3.5　创建分析项目……140

5.3.6 划分网格 ········ 142
5.3.7 施加载荷与约束 ········ 142
5.3.8 结果后处理 ········ 144
5.3.9 保存与退出 ········ 146
5.4 稳态导热案例二——复合层平壁导热 ········ 146
5.4.1 问题描述 ········ 146
5.4.2 解析方法计算 ········ 146
5.4.3 启动 Workbench 并建立分析项目 ········ 147
5.4.4 创建几何体模型 ········ 147
5.4.5 创建分析项目 ········ 148
5.4.6 划分网格 ········ 150
5.4.7 施加载荷与约束 ········ 151
5.4.8 结果后处理 ········ 152
5.4.9 保存与退出 ········ 154
5.5 通过圆筒壁的导热 ········ 155
5.5.1 第一类边界条件 ········ 155
5.5.2 第三类边界条件 ········ 157
5.6 稳态导热案例三——复合层圆筒壁导热 1 ········ 159
5.6.1 问题描述 ········ 159
5.6.2 解析方法计算 ········ 159
5.6.3 启动 Workbench 并建立分析项目 ········ 160
5.6.4 创建几何体模型 ········ 160
5.6.5 创建分析项目 ········ 162
5.6.6 划分网格 ········ 163
5.6.7 施加载荷与约束 ········ 164
5.6.8 结果后处理 ········ 166
5.6.9 保存与退出 ········ 167
5.7 稳态导热案例四——复合层圆筒壁导热 2 ········ 167
5.7.1 问题描述 ········ 168
5.7.2 解析方法计算 ········ 168
5.7.3 启动 Workbench 并建立分析项目 ········ 168
5.7.4 创建几何体模型 ········ 169
5.7.5 创建分析项目 ········ 171
5.7.6 划分网格 ········ 172
5.7.7 施加载荷与约束 ········ 173
5.7.8 结果后处理 ········ 175
5.7.9 保存与退出 ········ 176
5.8 稳态热分析案例五——各向异性结构导热 ········ 177
5.8.1 案例介绍 ········ 177
5.8.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ········ 177

5.8.3　创建几何体模型 ………… 178
5.8.4　创建分析项目 ………… 180
5.8.5　划分网格 ………… 182
5.8.6　施加载荷与约束 ………… 182
5.8.7　结果后处理 ………… 184
5.8.8　保存与退出 ………… 186
5.9　本章小结 ………… 186
第 6 章　非稳态导热分析 ………… 187
6.1　非稳态导热的基本概念 ………… 187
6.2　无限大平壁的瞬态导热 ………… 189
6.3　瞬态导热分析案例一——无限大平壁导热 ………… 193
6.3.1　问题描述 ………… 193
6.3.2　解析解法如下 ………… 193
6.3.3　启动 Workbench 并建立分析项目 ………… 194
6.3.4　创建几何体模型 ………… 195
6.3.5　创建分析项目 ………… 197
6.3.6　划分网格 ………… 198
6.3.7　施加载荷与约束 ………… 199
6.3.8　瞬态计算 ………… 200
6.3.9　保存与退出 ………… 202
6.4　瞬态导热分析案例二——热电偶节点散热仿真 ………… 203
6.4.1　问题描述 ………… 203
6.4.2　解析解法介绍 ………… 203
6.4.3　启动 Workbench 并建立分析项目 ………… 203
6.4.4　创建几何体模型 ………… 204
6.4.5　创建分析项目 ………… 205
6.4.6　划分网格 ………… 206
6.4.7　施加载荷与约束 ………… 207
6.4.8　结果后处理 ………… 208
6.4.9　保存与退出 ………… 210
6.5　瞬态导热分析案例三——圆柱筒导热 ………… 211
6.5.1　问题描述 ………… 211
6.5.2　解析解法介绍 ………… 211
6.5.3　启动 Workbench 并建立分析项目 ………… 213
6.5.4　创建几何体模型 ………… 213
6.5.5　创建分析项目 ………… 216
6.5.6　划分网格 ………… 217
6.5.7　施加载荷与约束 ………… 218
6.5.8　结果后处理 ………… 219
6.5.9　保存与退出 ………… 222
6.6　本章小结 ………… 223



第 7 章　非线性热分析……224
7.1　非线性热分析概述……224
7.2　非线性热分析案例——平板非线性热分析……224
7.2.1　案例描述……224
7.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目……225
7.2.3　创建几何体模型……225
7.2.4　创建分析项目……226
7.2.5　划分网格……228
7.2.6　施加载荷与约束……228
7.2.7　结果后处理……230
7.2.8　保存与退出……233
7.3　本章小结……233
第 8 章　热辐射分析……234
8.1　基本概念……234
8.1.1　热辐射的本质和特点……234
8.1.2　吸收、反射和投射……235
8.2　热辐射案例——空心半球与平板的热辐射……237
8.2.1　案例介绍……237
8.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目……237
8.2.3　定义材料参数……237
8.2.4　导入模型……238
8.2.5　划分网格……238
8.2.6　定义荷载……241
8.2.7　求解及后处理……244
8.2.8　保存并退出……245
8.3　本章小结……245

高级应用篇

第 9 章　相变分析……246
9.1　相变分析简介……246
9.1.1　相与相变……246
9.1.2　潜热与焓：……246
9.1.3　在 ANSYS Worbench 平台中相变分析的基本思路……247
9.2　相变分析案例——飞轮铸造模拟……248
9.2.1　问题描述……248
9.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目……248
9.2.3　导入几何体模型……250
9.2.4　创建分析项目……251
9.2.5　保存与退出……264
9.3　本章小结……264

第 10 章　优化分析 265
10.1　优化分析简介 265
10.1.1　优化设计概述 265
10.1.2　Workbench 结构优化分析简介 265
10.1.3　Workbench 结构优化分析 266
10.2　优化分析案例——散热肋片优化 267
10.2.1　问题描述 267
10.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目 267
10.2.3　创建几何体模型 268
10.2.4　创建分析项目 271
10.2.5　划分网格 273
10.2.6　施加载荷与约束 274
10.2.7　结果后处理 276
10.2.8　保存与退出 283
10.3　本章小结 283
第 11 章　热应力耦合分析 284
11.1　热应力概述 284
11.2　热应力基本理论 285
11.3　热应力案例一——瞬态热应力 287
11.3.1　热应力案例描述 287
11.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目 287
11.3.3　创建几何体模型 288
11.3.4　材料设置 289
11.3.5　划分网格 292
11.3.6　施加载荷与约束 292
11.3.7　结果后处理 294
11.3.8　保存与退出 300
11.4　热应力案例二——热应力对结构模态影响 300
11.4.1　启动 Workbench 并建立分析项目 301
11.4.2　创建几何体模型 301
11.4.3　创建分析项目 302
11.4.4　划分网格 304
11.4.5　施加载荷与约束 304
11.4.6　结果后处理 306
11.4.7　启动 Workbench 并建立分析项目 312
11.4.8　创建几何体模型 313
11.4.9　创建分析项目 314
11.4.10　划分网格 316
11.4.11　施加载荷与约束 316
11.4.12　结果后处理 318

11.4.13 启动 Workbench 并建立分析项目 ······ 324
11.4.14 创建几何体模型 ······ 324
11.4.15 创建分析项目 ······ 325
11.4.16 划分网格 ······ 326
11.4.17 施加载荷与约束 ······ 327
11.5 热应力案例三——热疲劳 ······ 329
11.5.1 案例描述 ······ 329
11.5.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ······ 329
11.5.3 创建几何体模型 ······ 329
11.5.4 材料设置 ······ 331
11.5.5 划分网格 ······ 332
11.5.6 施加载荷与约束 ······ 332
11.5.7 结果后处理 ······ 333
11.5.8 保存与退出 ······ 339
11.6 本章小结 ······ 339
第 12 章 热流耦合分析 ······ 340
12.1 流体动力学实例一——CFX 流场分析 ······ 340
12.1.1 问题描述 ······ 341
12.1.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ······ 341
12.1.3 创建几何体模型 ······ 341
12.1.4 网格划分 ······ 342
12.1.5 初始化及求解控制 ······ 346
12.1.6 流体计算 ······ 347
12.1.7 结果后处理 ······ 349
12.2 流体动力学实例二——Fluent 流场分析 ······ 350
12.2.1 问题描述 ······ 351
12.2.2 软件启动与保存 ······ 351
12.2.3 导入几何数据文件 ······ 351
12.2.4 网格设置 ······ 352
12.2.5 进入 Fluent 平台 ······ 355
12.2.6 材料选择 ······ 356
12.2.7 设置几何属性 ······ 357
12.2.8 流体边界条件 ······ 357
12.2.9 求解器设置 ······ 359
12.2.10 结果后处理 ······ 360
12.2.11 POST 后处理 ······ 362
12.3 流体动力学实例三——Icepak 流场分析 ······ 364
12.3.1 问题描述 ······ 366
12.3.2 软件启动与保存 ······ 366
12.3.3 导入几何数据文件 ······ 366

12.3.4　添加 Icepak 模块 ······ 367
12.3.5　热源设置 ······ 371
12.3.6　求解分析 ······ 372
12.3.7　POST 后处理 ······ 374
12.3.8　静态力学分析 ······ 375
12.4　本章小结 ······ 377
第 13 章　磁热耦合分析 ······ 378
13.1　磁热耦合概述 ······ 378
13.2　磁热耦合案例 ······ 379
13.2.1　问题描述 ······ 379
13.2.2　软件启动与保存 ······ 380
13.2.3　建立电磁分析 ······ 380
13.2.4　几何模型建立 ······ 381
13.2.5　求解域的设置 ······ 382
13.2.6　创建并赋材料 ······ 383
13.2.7　添加激励 ······ 386
13.2.8　分析步创建 ······ 387
13.2.9　模型检查与计算 ······ 391
13.2.10　后处理 ······ 391
13.2.11　创建几何数据共享 ······ 393
13.3　本章小结 ······ 399
第 14 章　电磁热流耦合分析 ······ 400
14.1　电磁热流耦合概述 ······ 400
14.2　电磁热流耦合案例 ······ 402
14.2.1　问题描述 ······ 402
14.2.2　软件启动与保存 ······ 402
14.2.3　建立电磁分析 ······ 403
14.2.4　几何模型建立 ······ 404
14.2.5　求解域的设置 ······ 407
14.2.6　创建并赋材料 ······ 407
14.2.7　添加激励 ······ 409
14.2.8　分析步创建 ······ 410
14.2.9　模型检查与计算 ······ 413
14.2.10　后处理 ······ 413
14.2.11　创建几何数据共享 ······ 415
14.3　本章小结 ······ 433
附录 A　常用材料的热物性表 ······ 434
附录 B　空气热物性参数 ······ 439
参考文献 ······ 441

基础理论篇

第 1 章 热力学分析的基础理论

热力学分析是研究计算传热学与热学的综合学科，本章内容主要以计算传热学的基础理论为主线，简单地介绍了传热学中的三个基本传热方式及基础理论，通过本章的学习，使读者对传热学基本概念和分析方法有总体的了解，为后面章节有限元分析的学习奠定一定的理论基础。

学习目标 / 知识点	了　　解	理　　解	应　　用	实　　践
传热学的基础	√	√		
三种传热方式		√	√	√
传热的基本应用		√	√	√

1.1 传热学概述

传热学是研究热量传递过程规律的一门科学。凡有温度差，就有热量自发地从高温物体传递到低温物体。

由于自然界和生产过程中到处都存在温度差，因此，传热是自然界和生产领域中非常普遍的现象，传热学的应用领域也十分广泛。传热学已是现代技术科学的主要技术基础学科之一，诸如以下领域都离不开传热学。

- 各种锅炉和换热设备的设计以及强化换热和节能而改进锅炉及其他换热设备的结构；
- 化学工业生产为维持化学工艺流程的温度而研制特殊要求的加热或冷却技术及余热回收；
- 电子工业中未解决超大规模集成电路或电子仪器而需研究散热方法；
- 机械制造工业测算和控制冷加工或者热加工中机件的温度场；
- 输电领域中为提高电力设备在高电压、大电流下的运行稳定性而研究其发热及散热特性；
- 核能、火箭等尖端技术中存在的需要解决的传热问题；
- 太阳能、地热能和工业余热利用工程中高效能换热器的开发和设计，以及应用传热学知识指导强化或削弱传热，达到节能目的；



● 其他如农业、生物、地质、气象、环保等。

近几十年来，传热学的成果对各个领域技术进步起到了很大的促进作用，而传热学向各个技术领域的渗透又推动了学科的迅速发展。

在电力行业与电力设备制造领域中更是不乏传热问题。例如电动机和变压器中冷却风扇的选择、配套和合理有效的利用，散热窗的布置与散热通道的开发、设计与实验研究，各供热设备管道的保温材料及建筑围护结构材料等的研制及热物理性质的测试、热损失的分析计算，各类换热器的设计、选择和性能评价等，都要求具备一定的传热学知识。传热学是一门重要的技术基础课程。

1.1.1 传热的基本方式

为了由浅入深地认识和掌握传热的规律，先来分析一些常见的传热现象。例如房屋墙壁在冬季的散热，整个过程如图 1-1 所示，可分为三段：首先热量由室内空气以对流换热的方式和墙与室内物体之间的辐射方式传给墙内表面；再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面；最后由墙外表面以空气对流换热和墙与周围物体间的辐射方式把热量传到室外环境。显然在其他条件不变时，室内外的温度差越大，传热量也越大。

又如，在热水暖气片的传热过程中，热水的热量先以对流换热的方式传递给壁内侧，再以导热方式通过壁，然后壁外侧空气以对流换热和壁与周围物体的辐射换热方式将热量传递给室内。

从上述两个简单传热过程的描述不难理解，传热过程是由导热、热对流及热辐射三种基本传热方式组合形成的。要了解传热过程的规律，就必须首先分析三种基本传递方式。

本节将对这三种基本传热方式作简要解释，并给出它们最基本的表达式，使读者对传热学有一个基本的了解和认识。

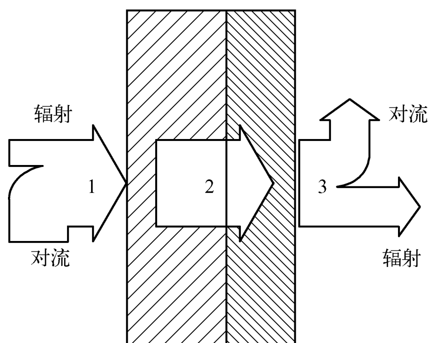


图 1-1　墙壁的散热

（1）导热

导热又称为热传导，是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象，导热是物质的属性，导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，单纯的导热一般只发生在密实的固体中，因为，在有温差时，液体和气体中可能出现热对流而难以维持单纯的导热。

大平壁导热是导热的典型问题。由前述墙壁的导热过程看出，平壁热量与壁两侧表面的温度差成正比，与壁厚成反比，并与材料的导热性能有关。因此，通过平壁的导热量的计算

式是：

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t A \, (\mathrm{W}) \tag{1-1a}$$

或热流密度

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \, (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-1b}$$

式中 A——壁面积，单位为 m^2；

δ——壁厚，单位为 m;

Δt——壁两侧表面的温差，$\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$，单位为℃；

λ——比例系数，称为导热系数或热导率，其意义是指单位厚度的物体具有单位温度差时，在它的单位面积上每单位时间的导热量，它的国际单位是 $\mathrm{W/(m \cdot K)}$。它表示材料导热能力的大小。导热系数一般由实验测定，例如，普通混凝土 $\lambda = 0.75 \sim 0.8$ $[\mathrm{W/(m \cdot K)}]$，纯铜的 λ 将近 $400[\mathrm{W/(m \cdot K)}]$。

在传热学中，常用电学欧姆定律的形式（电流=电位差/电阻）来分析热量传递过程中热量与温度差的关系。即把热流密度的计算式改写为欧姆定律的形式。

热流密度：
$$q = \frac{\text{温度差}\Delta t}{\text{热阻}R_t} \, (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-2}$$

与欧姆定律对比，可以看出热流相当于电流；温度差相当于电位差；而热阻相当于电阻。于是，得到了一个在传热学非常重要而且适用的概念——热阻。对不同的传热方式，热阻 R_t 的具体表达式将是不一样的。以平壁为例，改写式（1-1b）得：

$$q = \frac{\Delta t}{\delta / \lambda} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \, (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-1c}$$

用 R_λ 表示导热热阻，则平壁导热热阻为 $R_\lambda = \delta / \lambda$ ($\mathrm{m^2 \cdot K / W}$)。可见平壁导热热阻与壁厚成正比，而与导热系数成反比。R_λ 越大，则 q 越小。利用式（1-1a），对于面积为 $A\,(\mathrm{m^2})$ 的平壁，则热阻为 $\delta / (\lambda \cdot A)$ (K/W)。热阻的倒数称为热导，它相当于电导。

不同情况下的导热过程，导热的表达式亦各异。本书将就几种典型情况下的导热的宏观规律及其计算方法进行分章节论述。

（2）热对流

依靠流体的运动，把热量由一处传递到另一处的现象，称为热对流，热对流是传热的另一种基本方式。若热对流过程中单位时间通过单位面积有质量 M $[\mathrm{kg/(m^2 \cdot s)}]$ 的流体由温度 t_1 的地方流至 t_2 处，其比热容为 c_p $[\mathrm{J/(kg \cdot K)}]$，则此热对流的热流密度应为：

$$q = M c_p (t_2 - t_1) \, (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-3}$$

但值得注意的是，传热工程涉及的问题往往不单纯是热对流，而是流体与固体壁直接接触时的换热过程，传热学把它称为“对流换热”，也称为放热。而且因为有温度差，热对流将同时伴随热传导，所以，对流换热过程的换热机制既有热对流的作用，亦有导热的作用，故对流换热与热对流不同，它已不再是基本传热方式。计算对流换热的基本公式是牛顿于1701 年提出的，即：

$$q = h(t_w - t_f) = h \Delta t \, (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-4a}$$

或 $$\Phi = h(t_w - t_f)A = h\Delta t A\,(\mathrm{W}) \quad (1\text{−}4b)$$

式中 t_w——固体壁表面温度，单位为℃；

t_f——流体温度，单位为℃；

Δt——壁表面与流体温度差，单位为℃；

h——对流换热表面传热系数，其意义是指单位面积上，流体同壁面之间的单位温差在单位时间内所能传递的热量。常用的表面传热系数单位是 $[\mathrm{J/(m^2 \cdot s \cdot K)}]$ 或 $[\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}]$。$h$ 的大小表达了该对流换热过程的强度。例如热水暖气片外壁面和空气间的表面传热系数约为 $6[\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}]$，而它的内壁面和热水之间的 h 则可达数千 $\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$。附录 A 中列出一些典型条件下 h 的概略范围，仅供参考。由于 h 受制于多项影响因素，故研究对流换热问题的关键是如何确定表面传热系数。本书将对一些典型情况下的对流换热过程进行分析，并提供理论解与实验解。

式（1−4a）称为牛顿冷却定律（牛顿冷却公式）。按式（1−2）式提出的热阻概念改写（1−4a）得到如下关系式：

$$q = \frac{\Delta t}{1/h} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (1\text{−}4c)$$

式中，$R_h = 1/h$ 是单位壁表面积上的对流换热热阻 $[\mathrm{m^2 \cdot K/W}]$，根据式（1−4b），则表面积为 A 的壁面上的对流换热热阻为 $1/(h \cdot A)$，单位是 $\mathrm{K/W}$。

（3）热辐射

导热或对流都是以冷、热物体的直接接触来传递热量的，热辐射则不同，它依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线（电磁波，或者说光子）传递热量。物体表面每单位时间、单位面积对外辐射的热量称为辐射力，用 E 来表示，它的常用单位是 $[\mathrm{J/(m^2 \cdot s)}]$ 或 $(\mathrm{W/m^2})$，其大小与物体表面性质及温度有关。对于黑体（一种理想的热辐射表面），根据理论和实验验证，它的辐射力 E_b 与表面热力学温度的 4 次方成比例，即斯蒂芬—玻耳兹曼定律：

$$E_b = \sigma_b T^4\ (\mathrm{W/m^2}) \text{ 或 } \Phi = \sigma_b T^4 A\ (\mathrm{W}) \quad (1\text{−}5a)$$

上式也可以写作：

$$E_b = C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4\ (\mathrm{W/m^2}) \text{ 或 } \Phi = C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4 A\ (\mathrm{W}) \quad (1\text{−}5b)$$

式中 E_b——黑体辐射力，单位为 $(\mathrm{W/m^2})$；

σ_b——斯蒂芬—玻耳兹曼常数，亦称为黑体辐射常数，$\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8}[\mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}]$；

C_b——黑体辐射系数，$C_b = 5.67[\mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}]$；

T——热力学温度，单位为 K。

一切实际物体的辐射力都低于同温度下黑体的辐射力，等于：

$$E = \varepsilon \sigma_b T^4\ (\mathrm{W/m^2}) \text{ 或 } E = \varepsilon C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4\ (\mathrm{W/m^2}) \quad (1\text{−}5c)$$

式中，ε 是实际物体表面的发射率，也称为黑度，其值范围为 0～1。

物体间靠热辐射进行的热量传递称为辐射传热，它的特点是：在热辐射过程中伴随着能量形式的转换（物体内能→电磁波能→物体内能）；不需要冷却物体直接接触；不论温度高

低，物体都在不停地相互发射电磁波能，相互辐射能量，高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体向高温物体辐射的能量，总的结果是热由高温传到低温。

两个无限大的平行平面间的热辐射是最简单的辐射换热问题，设它的两表面热力学温度分别为T_1和T_2，且$T_1 > T_2$，则两表面间单位面积、单位时间辐射换热热流密度的计算公式为：

$$q = C_{1,2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-5d}$$

或$A\,(\mathrm{m^2})$上的辐射热流量：

$$\varPhi = C_{1,2}\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] A\ (\mathrm{W}) \tag{1-5e}$$

式中，$C_{1,2}$是 1 和 2 两个表面间的系统辐射系数，它取决于辐射表面材料性质及状态，其值范围为 0～5.67。关于辐射换热热阻的表述，将在后面讨论。本书的辐射换热部分将论述热辐射的宏观规律及若干典型条件下的辐射换热计算方法。

1.1.2 传热过程

工程中经常遇到两流体通过壁面的换热，即热量从壁一侧的高温流体通过壁传给另一侧的低温流体的过程，称为传热过程。在初步了解前述基本传热方式后，即可导出传热过程的基本计算式。

设有一大平壁，面积为A；它的一侧为温度t_{f1}的热流体，另一侧为温度t_{f2}的冷流体；两侧对流换热表面传热系数分别为h_1、h_2；壁面温度分别为t_{w1}和t_{w2}；壁的材料导热系数为λ；壁厚度为δ；如图 1–2 所示。

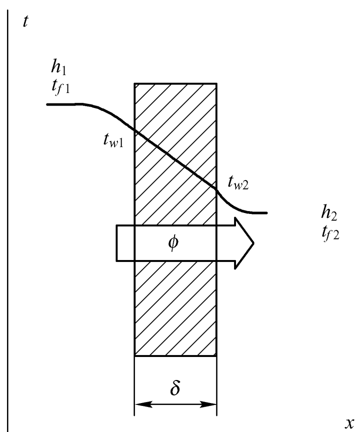


图 1–2　两流体间的传热过程

又设传热工况不随温度变化，即各处温度计热量不随时间改变，传热过程处于稳态，壁的长和宽均远大于它的厚度，可认为热流方向与壁面垂直。

若将该平壁在传热过程中的各处温度描绘在$t-x$坐标图上，图中的曲线所示即该壁传热过程的温度分布线。

按图 1–1 所示的分析方法，整个传热过程分三段，分别用下列三式表示如下。

热量由热流体以对流换热传给壁左侧，按式（1−4a），其热流密度为：

$$q = h_1(t_{f1} - t_{w1})$$

该热量又以导热方式通过壁，按式（1−1b）：

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{w1} - t_{w2})$$

它再由壁右侧以对流换热传给冷流体，即：

$$q = h_2(t_{w2} - t_{f2})$$

在稳态情况下，以上三式的热流密度 q 相等，把它们改写为：

$$\begin{cases} t_{f1} - t_{w1} = q/h_1 \\ t_{w1} - t_{w2} = q/\left(\frac{\lambda}{\delta}\right) \\ t_{w2} - t_{f2} = q/h_2 \end{cases}$$

三式相加，消去 t_{w1} 和 t_{w2}，整理后得该壁面传热热流密度为：

$$q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}(t_{f1} - t_{f2}) = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (\mathrm{W/m^2}) \tag{1−6a}$$

对 $A\,(\mathrm{m^2})$的平壁，传热热流量 Φ 为：

$$\Phi = qA = k(t_{f1} - t_{f2})A \ (\mathrm{W}) \tag{1−6b}$$

式中

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \ [\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}] \tag{1−7}$$

k 称为传热系数，它表明单位时间、单位壁面积上，冷热流体间每单位温度差可传递的热量，k 的国际单位是 $[\mathrm{J/(m^2 \cdot s \cdot K)}]$ 或 $[\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}]$，故 k 能反映传热过程的强弱。为理解它的意义，按热阻形式改写式（1−6a），得：

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{k}} = \frac{\Delta t}{R_k} \ (\mathrm{W/m^2}) \tag{1−6c}$$

R_k 为平壁单位面积传热热阻，即：

$$R_k = \frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \ (\mathrm{m^2 \cdot K/W}) \tag{1−8}$$

可见传热过程的热阻等于热流体、冷流体的传热热阻及导热热阻之和，相当于串联电阻的计算方法，掌握这一点对于分析和计算传热过程十分方便。由传热热阻的组成不难认识，传热阻力的大小与流体的性质、流动情况、壁的材料以及形状等许多因素有关，所以它的数值变化范围很大。例如，一砖厚度（240mm）的房屋外墙的 k 值约为 $2\,[\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}]$。在蒸

汽热水器中，k 值可达 $5000[\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}]$。对于换热器，$k$ 值越大，传热越好。但对建筑物围护结构和热力管道的保护层，它们的作用是减少热损失，k 值越小，保温性能越好，这就要求保温材料导热系数越小越好，从例题的计算可以得出一些重要的结论。

综上所述，学习传热学的目的概括起来就是：认识传热规律；计算各种情况下传热量或传热过程中的温度及其分布；学习增强或减弱热量传递的方法以及对热传导现象进行实验研究的方法。

1.2 导热

导热是指温度不同的物体各部分或温度不同的两个物体之间直接接触而发生的热传递现象。从微观角度来看，热是一种联系到分子、原子、自由电子等的移动、转动和振动的能量。因此，物质的导热本质或机理就必然与组成物质的微观粒子的运动有密切的关系。

在气体中，导热是气体分子不规则热运动时相互作用或碰撞的结果。

在介电体中，导热是通过晶格的振动，即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。由子晶格振动的能量是量子化的，人们把晶格振动的量子称为声子。这样，节点物质的导热可以看成是声子相互作用和碰撞的结果。

在金属中，导热主要是通过自由电子的相互作用和碰撞来实现，声子的相互作用和碰撞只起微小的作用。

至于液体的导热机理，相对于气体和固体而言，目前还不十分清楚。但近年来的研究结果表明，液体的导热机理类似于介电体，即主要依靠晶格的振动来实现。

应该指出，在液体和气体中，只有在消除热对流的条件下，才能实现纯导热过程，例如设置一个封闭的水平夹层，上为热板，下为冷板，中间充气体或液体，当上下两板温度差不大且夹层很薄时，可实现纯导热过程。

导热理论是从宏观角度进行现象分析的，它并不研究物质的微观结构，而把物质看作是连续介质。当研究对象的几何尺寸比分子的直径和分子间的距离大很多时，这种看法无疑是正确的。在一般情况下，大多数的固体、液体及气体，可以认为是连续介质。但在某些情形下，如稀薄的气体，就不能认为是连续介质。

在许多工程实践中，包括供热、通风和空调工程在内，导热是经常遇到的现象，例如建筑物的暖气片、墙壁和锅炉炉墙中的热量传递，热网地下埋设管道的热损失等。导热理论的任务就是要找出任何时刻物体中各处的温度。

为此，本章节将从温度分布的基本概念出发，讨论导热过程的基本规律以及描述物体内部温度分布的导热微分方程；此外，对求解导热微分方程所需要的条件进行简要说明。

1.2.1 基本概念及傅里叶定律

（1）基本概念

① 温度场

温度场是指某一时刻空间各点温度的总称。一般地说，它是时间和空间的函数，对直角坐标系即：

$$t = f(x, y, z, \tau) \qquad (1\text{–}9)$$

式中 t——温度；

x, y, z——直角坐标系的空间坐标；

τ——时间。

式（1–9）表示物体的温度在 x, y, z 三个方向和在时间上都发生变化的三维非稳态温度场。如果温度场不随时间而变化，即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$，则为稳态温度场，这时，$t = f(x, y, z, \tau)$。如果稳态温度场仅和两个或一个坐标有关，则称为二维或一维稳态温度场。一维稳态温度场可表示为：

$$t = f(x) \qquad (1\text{–}10)$$

它是温度场中最简单的一种情况，例如高宽远大于其厚度的大墙壁内的导热就可以认为是一维导热。具有稳态温度场的导热过程叫作稳态导热。温度场随时间变化的导热过程叫作非稳态导热。

② 等温面与等温线

同一时刻，温度场中所有温度相同的点连接所构成的面叫作等温面。不同的等温面与同一平面相交，则在此平面上构成一簇曲线，称为等温线。在同一时刻任何给定地点的温度不可能具有一个以上的不同值，所以两个不同温度的等温面或两条不同温度的等温线绝不会彼此相交。它们或者是物体中完全封闭的曲面（线），或者就终止于物体的边界上。

在任何时刻，标绘出物体中的所有等温面（线），就给出了物体内的温度分布情形，亦即给出了物体的温度场。所以，习惯上物体的温度场用等温面图或者等温线图来表示。图 1–3 就是用等温线图表示温度场的示例。

③ 温度梯度

在等温面上，不存在温度差异，因此，沿着等温面不可能有热量的传递。热量传递只发生在不同的等温面之间。自等温面上的某点出发，沿着不同方向到达另一等温面时，将发现单位距离的温度变化，即温度的变化率，具有不同的数值。自等温面上某点到另一个等温面，以该点法线方向的温度变化率为最大。沿该点法线方向，数值也正好等于这个最大温度变化率的矢量称为温度梯度，用 grad$t$ 表示，正向（符号取正）是朝着温度增加的方向，如图 1–4 所示。

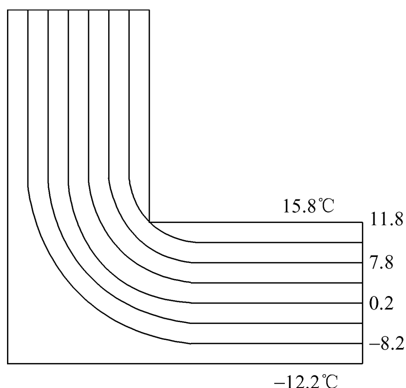


图 1–3　房屋墙角内的温度场

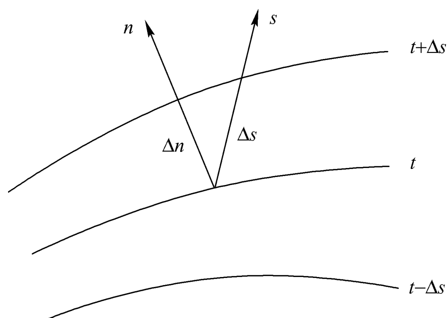


图 1–4　温度梯度

$$\mathrm{grad}t = \frac{\partial t}{\partial n} n \tag{1-11}$$

式中，n 为法线方向上的单位矢量，$\frac{\partial t}{\partial n}$ 为沿着法线方向温度的方向导数。温度梯度在直角坐标系三个坐标轴上的分量分别为 $\frac{\partial x}{\partial n}$、$\frac{\partial y}{\partial n}$、$\frac{\partial z}{\partial n}$。而且

$$\mathrm{grad}t = \frac{\partial t}{\partial x} i + \frac{\partial t}{\partial y} j + \frac{\partial t}{\partial z} k \tag{1-12}$$

式中，i、j 和 k 分别为三个坐标轴方向的单位矢量。温度梯度的负值，$-\mathrm{grad}t$ 称为温度降度，它是与温度梯度数值相等而方向相反的矢量。

④ 热流密度矢量

单位时间单位面积上所传递的热量称为热流密度。在不同方向上，热流密度的大小是不同的。与定义温度梯度相类似，等温面上某点以通过该点最大热流密度的方向为方向，数值上也正好等于沿着该方向热流密度的矢量称为热流密度矢量。其他方向的热流密度都是热流矢量在该方向的分量。热流密度矢量 q 在直角坐标系三个坐标轴上的分量为 q_x、q_y、q_z。而且：

$$q = q_x i + q_y j + q_z k \tag{1-13}$$

式中，i、j、k 分别为三个坐标方向的单位矢量。

（2）傅里叶定律

傅里叶在实验研究导热过程的基础上，把热流矢量和温度梯度联系起来，得到

$$q = -\lambda \mathrm{grad}t \ (\mathrm{W/m^2}) \tag{1-14}$$

上式就是 1822 年由傅里叶提出的导热基本定律的数学表达式，亦称为傅里叶定律。式中的比例系数 λ 称为导热系数。

式（1-14）说明，热流密度矢量和温度梯度位于等温面的同一法线上，但指向温度降低的方向，如图 1-5 所示，式中的负号表示热流矢量的方向与温度梯度的方向相反，永远顺着温度降低的方向。

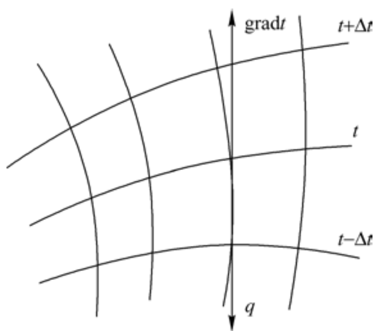


图 1-5　热流密度矢量和温度梯度

按照傅里叶定律和式（1-12）和（1-13）可以看出，热流密度矢量 x、y 和 z 轴的分量应为

$$
\begin{cases}
q_x = -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial x} \\
q_y = -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial y} \\
q_z = -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial z}
\end{cases}
\tag{1-15}
$$

值得指出的是，式（1−14）和式（1−15）中隐含着一个条件，就是导热系数在各个不同方向是相同的。这种导热系数与方向无关的材料称为各向同性材料。

傅里叶定律确定了热流密度矢量和温度梯度的关系。因此要确定热流矢量大小，就必须知道温度梯度，亦即物体内的温度场。

1.2.2 导热系数

导热系数是物质的一个重要热物性参数，可以认为，式（1−6）就是导热系数的定义式，即：

$$
\lambda = \frac{q}{-\mathrm{grad}t} \tag{1-16}
$$

可见，导热系数的数值就是物体中单位温度梯度、单位时间、通过单位面积的导热量，它的单位是 $W/(m \cdot K)$ 。导热系数的数值表征物质导热能力的大小。

工程计算采用的各种物质的导热系数的数值一般都由实验测定。一些常用物质的导热数值列于表 1−1 和附录 2～8 中。

一般而言，金属比非金属具有更高的导热系数；物质的固相比它们的液相具有较高的导热性能；物质液相的导热系数又比其气相高；不论金属或非金属，它的晶体比它的无定形态具有较好的导热性能；与纯物质相比，晶体中的化学杂质使其导热性能降低；纯金属比它们相应的合金具有高得多的导热系数。

表 1−1　273K 时物质的导热系数

材料	导热系数 [W/(m·K)]	材料	导热系数 [W/(m·K)]	材料	导热系数 [W/(m·K)]
金属固体：		石英（平行于轴）	19.1	氯代甲烷（CH_3Cl）	0.178
纯银	418	钢玉石（Al_2O_3）	10.4	氟利昂（CCl_2F_2）	0.0728
纯铜	387	大理石	2.78	二氧化碳（CO_2）	0.105
纯铝	203	冰，H_20	2.22	气体：	
纯锌	112.7	熔凝石英	1.91	氢	0.175
纯铁	73	硼硅酸耐热玻璃	1.05	氦	0.141
纯锡	66	液体：		空气	0.0243
纯铅	34.7	水银	8.21	戊烷	0.0128
非金属固体：		水	0.552	三氯甲烷	0.0066
方镁石（MgO）	41.6	SO_2	0.211		

物质的导热系数不但因物质的种类而异，而且还和物质的温度、压力等因素有关。导热既然是在温度不同的物体各部分之间进行的，所以温度的影响尤为重要。在一定温度范围

内，许多工程材料的导热系数可以认为是温度的线性函数，即：

$$\lambda = \lambda_0(1+bt) \quad (1-17)$$

式中，λ_0 为某个参考温度时的导热系数，b 为由实验确定的常数。

不同物质导热系数的差异是由于物质构造上的差别以及导热的机理不同所致。为了更全面地了解各种因素，下面分别研究气体、液体和固体（金属和非金属材料）的导热系数。

（1）气体的导热系数

气体导热系数的数值约在 $0.006 \sim 0.6$ [W/(m·K)] 范围内。气体的导热是由于分子的热运动和相互碰撞时所发生的能量传递。根据气体分子运动理论，在常温常压下，气体的导热系数可以表示为：

$$\lambda = \frac{1}{3}\bar{u}l\rho c_v \quad (1-18)$$

式中，$\bar{u}$ 为气体分子运动的平均速度，l 为气体分子在两次碰撞间的平均自由行程，ρ 为气体的密度，c_v 为气体的比定容热容。

当气体的压力升高时，气体的密度也增加，自由行程 l 则减小，而乘积 ρl 保持常数。因而，除非压力小于 (2.67×10^{-3})MPa ）或压力高于 (2.0×10^{3})MPa ），可以认为气体的导热系数不随压力发生变化。

图 1−6 给出了几种气体的导热系数随温度变化的实测数据。由图 1−6 可知，气体的导热系数随温度升高而增大，这是因为气体分子运动的平均速度和比定容热容随温度的升高而增大所致。气体中的氢和氦的导热系数远高于其他气体，大约为其他气体的 4 ~ 9 倍，如图 1−7 所示，这一点可以从它们的分子质量很小，因而有较高的平均速度得到解释。在常温下，空气的导热系数为 0.025 [W/(m·K)] 。房屋双层玻璃窗中的空气夹层，就是利用空气的低导热性起到降低散热作用的。

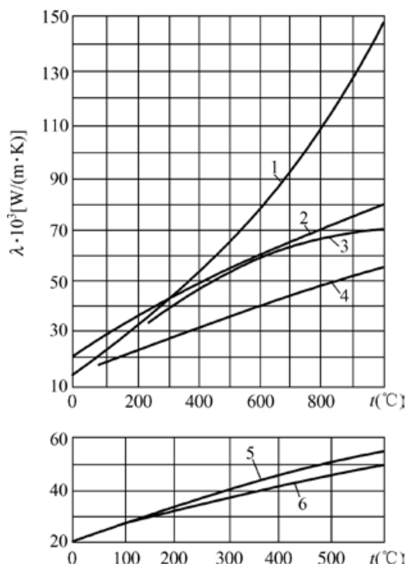


图 1−6 气体的导热系数

1−水蒸气；2−二氧化碳； 3−空气；4−氩；5−氧；6−氮

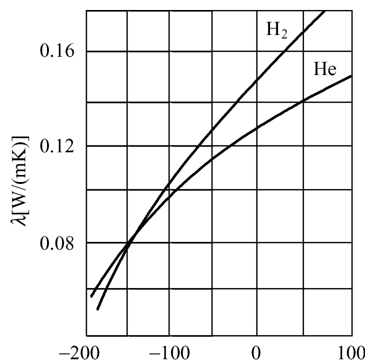


图 1−7 氢和氦的导热系数

混合气体的导热系数不能像比热容那样简单地用部分求和的方法来确定，科学家们提出

了若干种计算方法，但归根结底，必须用实验方法确定。

（2）液体的导热系数

液体的导热系数的数值约为 0.07～0.7[W/(m·K)]范围内。液体的导热主要是依靠晶格的振动来实现的。应用这一概念来解释不同液体的实验数据，其中大多数都得到了很好地证实，据此得到的液体导热系数的经验公式：

$$\lambda = A\frac{c_p\rho^{\frac{4}{3}}}{M^{\frac{1}{3}}} \tag{1-19}$$

式中，c_p 为液体的比定压热容，ρ 为液体的密度，M 为液体的分子量。系数 A 与晶格振动在液体中的传播速度成正比，它与液体的性质无关，但与温度有关。一般情况下可认为 $Ac_p = \text{const}$。对于非缔合液体或弱缔合液体，其分子量是不变的，由式（1−19）可以看出，当温度升高时，由于液体密度减小，导热系数是下降的。对于强缔合液体，例如水和甘油等，其分子量是变化的，而且随温度而变化。因此，在不同的温度时，它们的导热系数随温度变化的规律是不一样的。图 1−8 给出了一些液体导热系数随温度的变化。

（3）固体的导热系数

① 金属的导热系数

各种金属的导热系数一般在 12～418[W/(m·K)]范围内变化。大多数纯金属的导热系数随温度的升高而减小，如图 1−9 所示。这是因为金属的导热是依靠自由电子的迁移和晶格振动来实现的，而且主要依靠前者，当温度升高时，晶格振动的加强干扰了自由电子的运动，使导热系数下降。

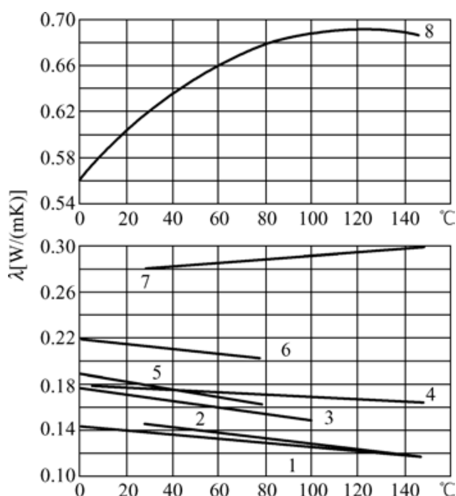


图 1−8　液体的导热系数

1−凡士林油；2−苯；3−丙酮；4−蓖麻油；
5−乙醇；6−甲醇；7−甘油；8−水

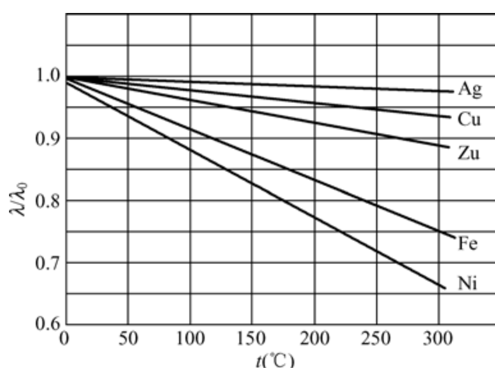


图 1−9　金属的导热系数

金属导热与导电的机理是一致的，所以金属的导热系数与导电率互成比例。银的导热系数就像它的导电能力一样是很高的，然后依次为铜、金、铝。

在金属中掺入任何杂质，将破坏晶格的完整性而干扰自由电子的运动，使导热系数变

小。例如，在常温下纯铜的导热系数为 387[W/(m·K)]，而黄铜（70%Cu，30%Zn）的导热系数降低为 109[W/(m·K)]。

另外，金属加工过程也会造成晶格的缺陷，所以化学成分相同的金属，导热系数也会因加工情况而有所不同。大部分合金的导热系数随温度的升高而增大。

② 非金属材料（介电体）的导热系数

建筑环境与设备工程专业特别感兴趣的是建筑材料和隔热材料。这一类材料的导热系数大约在 0.025～3.0[W/(m·K)]范围内。它们的导热系数都随温度的升高而增大。岩棉制品、膨胀珍珠岩、矿渣棉、泡沫塑料、膨胀蛭石、微孔硅酸钙制品等都属于这类材料。严格地讲，这些材料不应视为连续介质，但如果空隙的大小和物体的总几何尺寸比起来很小的话，仍然可以有条件地认为它们是连续介质，用表观导热系数或当作连续介质时的折算导热系数来考虑。

在多孔材料中，填充空隙的气体（例如空气）具有低的导热系数，所以良好的保温材料都是空隙多、相应地体积重量（习惯上简称“密度”）轻的材料。

根据这一特点，除利用天然材料（例如石棉等）外，还可以人为地增加材料的空隙以提高保温能力，例如微孔硅酸钙、泡沫塑料和加气混凝土等。但是，密度轻到一定程度后，小的空隙会连成沟道或者使空隙较大，引起空隙内的空气对流作用加强，空隙壁间的辐射已有所加强，反而会使表观导热系数升高。

多孔材料的导热系数受湿度的影响很大。由于水分的渗入，替代了相当一部分空气，而且更主要的是水分将从高温区向低温区迁移而传递热量。因此，湿材料的导热系数比干材料和水都要大。例如，干砖的导热系数为 0.35[W/(m·K)]，水的导热系数 0.6[W/(m·K)]，而湿砖的导热系数高达 1.0[W/(m·K)]左右。所以对建筑物的围护结构，特别是冷、热设备的保温层，都应采取防潮措施。

前已述及，分析材料的导热性能时，还应区分各向同性材料和各向异性材料。例如木材，其沿不同方向的导热系数不同，木材纤维方向导热系数的数值比垂直纤维方向的数值高一倍，这种材料称为各向异性材料。用纤维和树脂等增强、粘合的复合材料也是各向异性材料。本书在以后分析讨论中，都只限于各向同性材料。

表 1-2 给出了一些建筑、保温材料的导热系数和密度数值，以供参考。

表 1-2　建筑和保温材料导热系数和密度的数值

材料名称	温度 t /℃	密度 ρ /(kg/m³)	导热系数 λ /[W/(m·K)]	材料名称	温度 t /℃	密度 ρ /(kg/m³)	导热系数 λ /[W/(m·K)]
膨胀珍珠岩散料	25	60～300	0.021～0.062	硬泡沫塑料	30	29.5～56.3	0.041～0.048
岩棉制品	20	80～150	0.035～0.038	软泡沫塑料	30	41～162	0.043～0.056
膨胀蛭石	20	100～130	0.051～0.07	铝箔间隔层（5 层）	21		0.042
石棉绳		590～730	0.1～0.21	红砖（营造状态）	25	1860	0.87
微孔硅酸钙	50	82	0.049	红砖	35	1560	0.49
粉煤灰砖	27	458～589	0.12～0.22	水泥	30	1900	0.30
矿渣棉	30	207	0.058	混凝土板	35	1930	0.79
软木板	20	105～437	0.044～0.079	瓷砖	37	2090	1.1
木丝纤维	25	245	0.048	玻璃	45	2500	0.65～0.71

云母		290	0.58	板聚苯乙烯	30	24.7～37.8	0.04～0.043

1.2.3 导热微分方程式

傅里叶定律确定了热流密度矢量和温度梯度之间的关系。但是要确定热流密度矢量的大小，还应进一步知道物体内的温度场，即：

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

为此，像其他数学物理问题一样，首先要找到描述上式的微分方程。这可以在傅里叶定律的基础上，借助热力学第一定律，即能量守恒与转化定律，把物体内各点的温度关联起来，建立起温度场的通用微分方程，亦即导热微分方程。

假定所研究的物体是各向同性的连续介质，其导热系数 λ 、比热容 c 和密度 ρ 均为已知，并假定物体内具有内热源，例如化学反应时放出反应热、电阻通电发热，以及熔化过程中吸收物理潜热等，这时内热源为负值。用单位体积单位时间内所发出的热量 q_v (W/m^3) 表示内热源的强度。

基于上述各项假定，再从进行导热过程的物体中分割出一个微元体 $dV = dxdydz$ ，微元体的三个边分别平行于 x ，y 和 z 轴，如图 1−10 所示。

根据能量守恒与转化定律，对微元体进行热平衡分析，那么在 $d\tau$ 时间内导入与导出微元体的净热量，加上热源的发热量，应该等于微元体热力学能量的增加，即：

导入与导出微元体的净热量+微元体中内热源的发热量=微元体热力学能的增加（1−20）

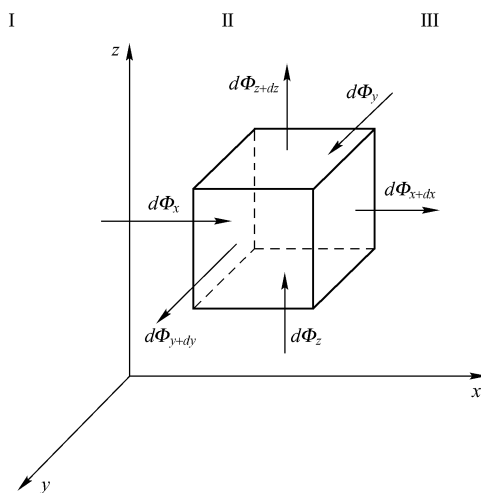


图 1−10　微元体的导热

下面分别计算式（1−20）中的 I、II 和 III 三项。

导入与导出微元体的净热量可以由 x ，y 和 z 三个方向导入与导出微元体的净热量相加得到。在 $d\tau$ 时间内，沿 x 轴方向，经 x 表面导入的热量为：

$$d\Phi_x = q_x dydzd\tau$$

经 $x + dx$ 表面导出的热量为：



$$d\Phi_{x+dx} = q_{x+dx}dydzd\tau$$

而：$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x}dx$

于是，在 $d\tau$ 时间内，沿 x 轴方向导入与导出微元体的净热量为：

$$d\Phi_x - d\Phi_{x+dx} = -\frac{\partial q_x}{\partial x}dxdydzd\tau$$

同理，此时间内，沿 y 轴方向和 z 轴方向，导入与导出微元体的净热量分别为：

$$d\Phi_y - d\Phi_{y+dy} = -\frac{\partial q_y}{\partial y}dxdydzd\tau$$

$$d\Phi_z - d\Phi_{z+dz} = -\frac{\partial q_z}{\partial z}dxdydzd\tau$$

将 x，y 和 z 三个方向导入与导出微元体的净热量相加得到：

$$\text{I} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right)dxdydzd\tau \qquad (1\text{−}21)$$

将式（1−15）代入式（1−21），可以得到：

$$\text{I} = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)\right]dxdydzd\tau \qquad (1\text{−}22)$$

在 $d\tau$ 时间内，微元体中内热源的发热量为：

$$\text{II} = q_v dxdydzd\tau \qquad (1\text{−}23)$$

在 $d\tau$ 时间内，微元体中热力学能的增量为：

$$\text{III} = \rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}dxdydzd\tau \qquad (1\text{−}24)$$

对于固体和不可压缩的流体，比定压热容 c_p，即 $c_p = c_v = c$。将式（1−22）、（1−23）和式（1−24）代入式（1−20），消去等号两边的 $dxdydzd\tau$，可得：

$$\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right) + q_v \qquad (1\text{−}25)$$

式（1−25）称为导热微分方程式，实际上它是导热过程的能量方程。上式借助于能量守恒定律和傅里叶定律把物体中各点的温度联系起来，它表达了物体的温度随空间和时间变化的关系。

当热物性参数导热系数 λ、比热容 c 和密度 ρ 均为常数时，式（1−25）可以简化为：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) + \frac{q_v}{\rho c} \qquad (1\text{−}26)$$

或写成：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha\nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho c}$$

式中，∇^2 为拉普拉斯运算符；$\alpha = \dfrac{\lambda}{\rho c}$ 为热扩散率，它的单位是 m^2/s。热扩散率 α 表征物体被加热或冷却时，物体内各部分温度去向均匀一致的能力。例如，木材的热扩散率 $\alpha = (1.5\times10^{-7})$ (m^2/s)；铝的热扩散率 $\alpha = (9.45\times10^{-5})$ (m^2/s)，木材的热扩散率约为铝的 $1/600$，所以燃烧木棒的一端已达到很高的温度，而另一端仍保持不烫手的温度。热扩散率对非稳态导热过程具有很重要的意义。

当热物性为常数且无热源时，式（1−26）可写成：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t \tag{1−27}$$

对于稳态温度场，$\dfrac{\partial t}{\partial \tau} = 0$，式（1−26）可以简化为：

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \tag{1−28}$$

对于无内热源的稳态温度场，式（1−28）可进一步简化为：

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \tag{1−29}$$

在这种情况下，微元体的热平衡式（1−24）中的Ⅱ和Ⅲ两项均为零，所以导入和导出微元体的净热量也为零，即导入微元体的热量等于导出微元体的热量。

当所分析的对象为轴对称物体（圆柱、圆筒或圆球）时，采用圆柱坐标系 (r,ϕ,z) 或球坐标系 (r,ϕ,θ) 更为方便。这样，通过坐标变换（如图 1−11 所示），可以将式（1−25）转换为圆柱坐标系或者圆球坐标系的公式，对于圆柱坐标系，式（1−25）可改写为：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q_v \tag{1−30}$$

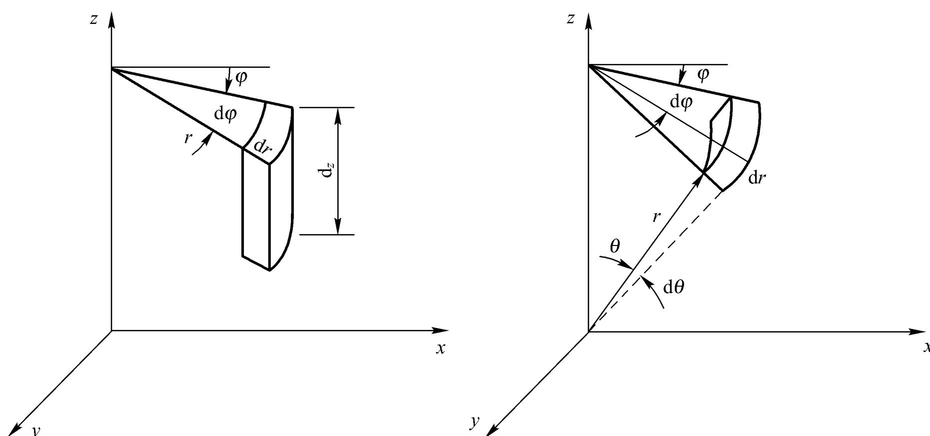


图 1−11　圆柱和圆球坐标系

对于圆球坐标系，式（1−25）可改写为：

$$\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r^2\frac{\partial t}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial \phi}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\lambda\sin\theta\frac{\partial t}{\partial \theta}\right)+q_v \qquad (1-31)$$

1.2.4 导热的单值性条件

导热微分方程式是根据热力学第一定律和傅里叶定律所建立起来的描写物体温度随空间和时间变化的关系式，它没有涉及某一特定导热过程的具体特点，因此它是所有导热过程的通用表达式。

欲从众多的不同导热过程中区分出人们所研究的某一特定的导热过程，还需对该过程作进一步的具体说明，这些补充说明条件总称为单值性条件。

从数学角度来看，求解导热微分方程式可以获得方程式的通解。然而就特定的导热过程而言，不仅要得到通解，而且要得到既满足导热微分方程式、又满足该过程的补充说明条件的唯一解。

把这种特定唯一解的附加补充说明条件称为单值性条件。因此，对于一个具体给定的导热过程，其完整的数据描述应包括导热微分方程式和它的单值性条件两部分。

单值性条件一般地说有以下 4 项。

（1）几何条件

说明参与导热过程的物体的几何形状和大小。例如，形状是平壁或圆柱壁以及它们的厚度、直径等几何尺寸。

（2）物理条件

说明参与导热过程的物理特征。例如，给出参与导热过程物体的热物性参数导热系数 λ、比热容 c 和密度 ρ 等的数值，它们是否随温度发生变化；是否有内热源，以及它的大小和分布情形。

（3）时间条件

说明在时间上过程进行的特点。稳态导热过程没有单值性的时间条件，因为过程的进行不随时间发生变化。对于非稳态导热过程，应该说明开始时刻物体内部的温度分布，它可以表示为：

$$t\big|_{t=0}=f(x,y,z) \qquad (1-32)$$

故时间条件又称为初始条件。初始条件可以是各种各样的空间分布，例如，加热或冷却一个物体时，在过程开始时刻，物体的各部分具有相同的温度，那么初始条件表示式为：

$$t\big|_{t=0}=t_0=\text{const} \qquad (1-33)$$

（4）边界条件

人们所研究的物体总是和周围环境有某种程度的相互联系。它往往也就是物体内导热过程发生的原因。因此，凡说明物体边界上过程进行的特点，反映过程与周围环境相互作用的条件称为边界条件。常见的边界条件的表达方式可以分为三类：

① 第一类边界条件是已知任何时刻物体边界面上的温度值，即：

$$t\big|_s=t_w \qquad (1-34)$$

式中，下标 s 表示边界面，t_w 是温度在边界面 s 的给定值。对于稳态导热过程，t_w 不随时间

发生变化，即 $t_w = \text{const}$；对于非稳态导热过程，若边界面上温度随时间而变化，还应给出 $t_w = f(\tau)$ 的函数关系。例如，如图 1−12 所示的一维无限大平壁，平壁两侧表面各为持恒定的温度 t_{w1} 和 t_{w2}，它的第一类边界条件可以表示为：

$$t\big|_{t=0} = t_{w1}\text{；}\quad t\big|_{t=\delta} = t_{w2}$$

对于二维或三维稳态温度场，它的边界面超过两个，这时应逐个按边界面给定它们的温度值。

② 第二类边界条件是已知任何时刻物体边界面上的热流密度值。因为傅里叶定律给出了热流密度矢量与温度梯度之间的关系，所以第二类边界条件等于已知任何时刻物体边界面 s 法向的温度变化率的值。值得注意的是，已知边界面上温度变化率的值，并不是已知物体的温度分布，因为物体内各处的温度梯度和边界面上的温度值都还是未知的。第二类边界可以表示为：

$$q\big|_s = q_w$$

或

$$-\frac{\partial t}{\partial n}\bigg|_s = \frac{q_w}{\lambda} \tag{1−35}$$

式中，q_w 是给定的通过边界面 s 的热流密度，对于稳态导热过程，$q_w = \text{const}$；对于非稳态导热过程，若边界面上热流密度是随时间变化的，还要给出 $q_w = f(\tau)$ 的函数关系。如图 1−13 所示的肋片基处的边界条件，就是 $x = 0$ 界面处热流密度值恒定为 q_w，这时第二类边界条件可以表示为：

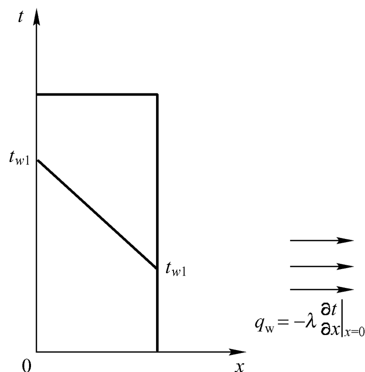


图 1−12　无限大平壁的第一类边界条件



图 1−13　肋片的第二、三类边界条件

$$-\frac{\partial t}{\partial x}\bigg|_{x=0} = \frac{q_w}{\lambda}$$

若某一个边界面 s 是绝热的，根据傅里叶定律，该边界面上温度变化率数值为零，即：

$$\frac{\partial t}{\partial n}\bigg|_s = 0 \tag{1−36}$$

例如，对于以后将要讨论的肋片，由于肋片的温度沿着肋片高度而下降，所以对于很高

的肋片，它的端部温度与周围空气的温度就很接近，可以近似地认为端部是绝热的，如图 1–13 所示，这时肋片端部的边界条件应写为：

$$\left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{x=l}=0$$

③ 第三类边界条件是已知边界面周围流体温度 t_f 和边界面与流体之间的表面传热系数 h。根据牛顿冷却定律，物体边界面 s 与流体间的对流换热量可以写为：

$$q=h(t|_s-t_f)$$

于是，第三类边界条件可以表示为：

$$-\lambda\left.\frac{\partial t}{\partial n}\right|_s=h(t|_s-t_f) \tag{1–37}$$

如图 1–13 所示，若肋片端部与周围空气的对流换热不允许忽略，那么肋片端部的第三类边界条件可以表示为：

$$-\lambda\left.\frac{\partial t}{\partial n}\right|_{x=l}=h(t|_{x=l}-t_f)$$

对于稳态导热过程，h 和 t_f 不随时间而变化；对于非稳态导热过程，h 和 t_f 可以是时间的函数，这时还要给出它们和时间的具体函数关系。应该注意的是，式（1–37）中已知的条件是 h 和 t_f，而 $\left.\frac{\partial t}{\partial n}\right|_s$ 和 $t|_s$ 都是未知的，这正是第三类边界条件与第一类、第二类边界条件的区别所在。在确定某一个边界面的边界条件时，应根据物理现象本身在边界面的特点给定，不能对同一界面同时给出两种边界条件。

1.3 本章小结

本章从最基本的热传导、热辐射及热对流三种基本公式及原理出发，对传热学中的相关理论及使用范围进行了详细介绍，并列举出不同类型边界条件时的解析公式。

第2章 几 何 建 模

ANSYS 17.0 是 ANSYS 公司较新版本的多物理场分析平台，其中提供了大量全新的先进功能，有助于更好地掌握设计情况从而提升产品性能和完整性。将 ANSYS 17.0 的新功能与 ANSYS Workbench 相结合，可以实现更加深入和广泛的物理场研究，并通过扩展满足客户不断变化的需求。

ANSYS 17.0 采用的平台可以精确地简化各种仿真应用的工作流程。同时，ANSYS 17.0 提供了多种关键的多物理场解决方案、前处理和网格剖分强化功能，以及一种全新的参数化高性能计算（HPC）许可模式，可以使设计探索工作更具扩展性。

学习目标 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
ANSYS17.0 平台及各个模块的主要功能		√		
ANSYS Workbench 几何建模步骤			√	√
ANSYS Workbench 几何导入			√	√
ANSYS Workbench 草绘面板使用			√	√

2.1　ANSYS Workbench 17.0 平台及模块

ANSYS Workbench 17.0 软件平台的启动方法如图 2-1 所示，经常使用 ANSYS Workbench 17.0，程序会自动在开始菜单所有程序的上方出现 Workbench 17.0 的快速启动图标，如图 2-2 所示，此时可以单击 Workbench 17.0 按钮启动 Workbench 17.0。



图 2-1　Workbench 启动路径



图 2-2　Workbench 快速启动

2.1.1 Workbench 平台界面

启动后的 Workbench 17.0 平台如图 2-3 所示。启动软件后，可以根据个人喜好设置下次启动是否同时开启导读对话框，如果不想启动导读对话框，取消勾选导读对话框底端的复选框即可。

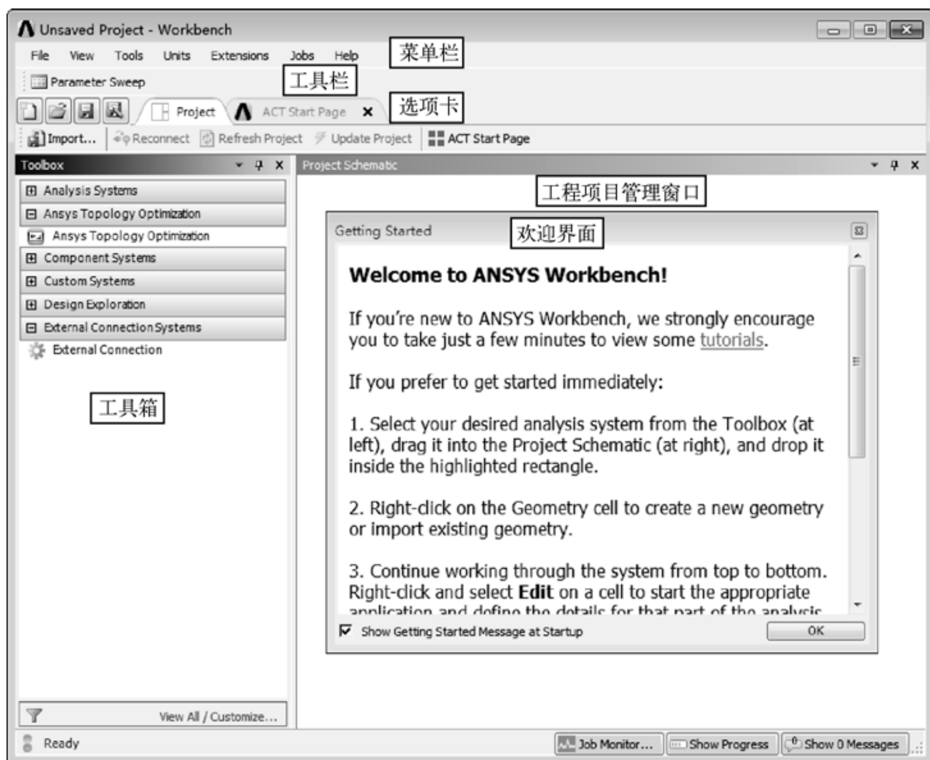


图 2-3 Workbench 软件平台

如上所示，ANSYS Workbench 17.0 平台界面由菜单栏、工具栏、工具箱（Toolbox）、工程项目窗口（Project Schematic）、信息窗口（Message）、进程窗口（Progress）及属性窗口六个部分构成。

2.1.2 菜单栏

菜单栏包括 File（文件）、View（视图）、Tools（工具）、Units（单位）、Extensions（扩展）、Jobs（工作）及 Help（帮助）六个菜单。下面对这六个菜单中包括的子菜单及命令详述如下。

1．File（文件）菜单

File（文件）菜单中的命令如图 2-4 所示，下面对 File（文件）菜单中的常用命令进行简单介绍。

（1）New：建立一个新的工程项目，在建立新工程项目前，Workbench 软件会提示用户是否需要保存当前的工程项目。

（2）Open…：打开一个已经存在的工程项目，同样会提示用户是否需要保存当前工程项目。

（3）Save：保存一个工程项目，同时为新建立的工程项目命名。

（4）Save As…：将已经存在的工程项目另保存为一个新的项目名称。

（5）Import…：导入外部文件，选择 Import 命令会弹出图 2-5 所示的对话框，在 Import 对话框的文件类型栏中可以选择多种文件类型。

注：文件类型中的 HFSS Project File（*.hfss）、Maxwell Project File（*.mxwl）和 Simplorer Project File（*.asmp）三个文件需要安装 ANSYS Electromagnetics Suite 17.0 电磁系列软件才会出现。

ANSYS Workbench17.0 平台支持 ANSYS Electromagnetics Suite 17.0。

图 2-4　File 文件菜单



图 2-5　Import 支持文件类型

（6）Archive：将工程文件存档，如果项目工程文件没有保存，软件会提示先保存文件。选择 Archive 命令后，在弹出的图 2-6 所示的 Save Archive 对话框中单击“保存”按钮，在弹出的图 2-7 所示的 Archive Options 对话框中勾选所有复选框，并单击 Archive 按钮将工程文件存档，在 Workbench 17.0 平台的 File 菜单中选择 Restore Archive 命令即可将存档文件读取出来，这里不再赘述，请读者自己完成。

图 2-6　Save Archive 对话框

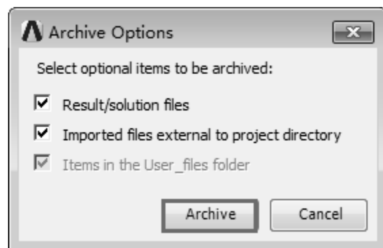


图 2-7　Archive Options 对话框

（7）Scripting：脚本语言，ANSYS Workbench 平台支撑的脚本语言有 Python（*.py）及

自带脚本（*.wbjn）两种格式。选择 Scripting 时，此时会出现图 2-8 所示子菜单，子菜单中包括以下三个选项：

1）Record Journal…：录制脚本语言，选择此命令后开始对当对 Workbench 平台中的所有操作用脚本语言进行记录，脚本格式为*.wbjn；

2）Run Script File…：运行一个已经存在的脚本语言，脚本包括*.wbjn 和*.py 两种格式，如图 2-9 所示

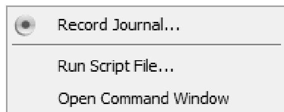


图 2-8　脚本命令

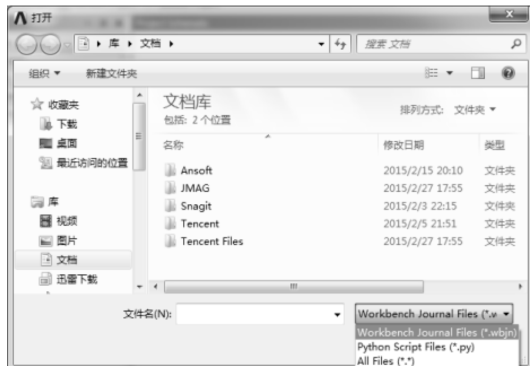


图 2-9　脚本格式

3）Open Command Window：打开命令窗口，此时将弹出 Python 脚本语言对话框命令窗口，此时在窗口中输入如下代码。

```
print“Hello Workbench!”
```

这时将在下行中显示 Hello Workbench！字样，如图 2-10 所示，ANSYS Workbench 平台的脚本语言非常强大，通过 Workbench 平台可进行模块的建立、材料的添加等。

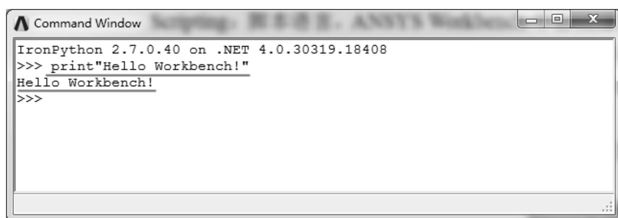


图 2-10　Python 脚本命令框

2. View（视图）菜单

View（视图）菜单中的相关命令如图 2-11 所示，下面对 View（视图）菜单中的常用命令作简要介绍。

（1）Refresh（刷新）：刷新项目管理窗口。

（2）Compact Mode（简洁模式）：选择此命令后，Workbench 17.0 平台将压缩为一个小图标 kongqimotai_ansys - Workbench 置于操作系统桌面上，同时在任务栏上的图标将消失。如果将鼠标移动到 kongqimotai_ansys - Workbench 图标上，Workbench 17.0 平台将变如图 2-12 所示的简洁形势。

（3）Reset Workspace（复原操作平台）：将 Workbench 17.0 平台复原到初始状态。

（4）Reset Window Layout（复原窗口布局）：如果平台的布局经过更改，通过此命令能将 Workbench 17.0 平台窗口布局复原到初始状态。

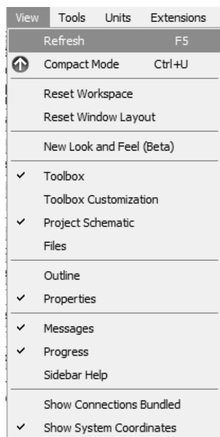


图 2-11　View 菜单

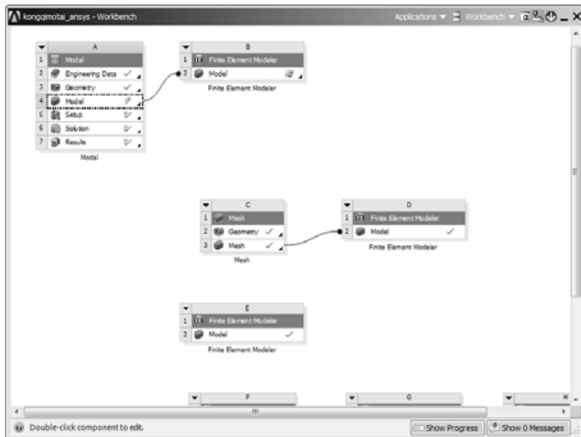


图 2-12　Workbench 17.0 简洁模式

（5）Toolbox（工具箱）：选择 Toolbox 命令来选择是否掩藏左侧面的工具箱，Toolbox 前面有√，说明 Toolbox（工具箱）处于显示状态，单击 Toolbox 取消勾选该选项，Toolbox（工具箱）将被掩藏。

（6）Toolbox Customization（用户自定义工具箱）：选择此命令将在窗口中弹出图 2-13 所示的 Toolbox Customization 窗口，用户可通过单击各个模块前面的√来选择是否在 Toolbox 中显示该模块。

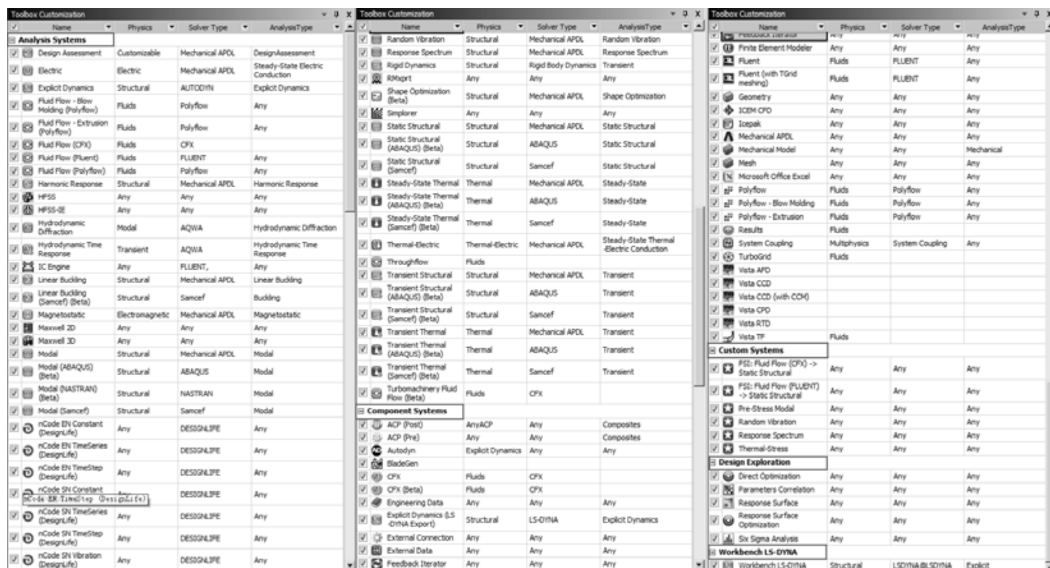


图 2-13　Toolbox Customization 窗口

（7）Project Schematic（项目管理）：选择此命令来确定是否在 Workbench 平台上显示项目管理窗口。

（8）Files（文件）：选择此命令会在 Workbench 17.0 平台下侧弹出图 2-14 所示的 Files 窗口，窗口中显示了本个工程项目中所有的文件及文件路径等重要信息。

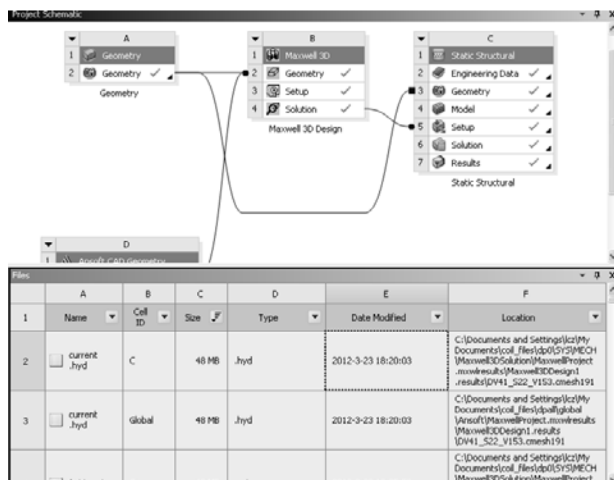


图 2-14　Files 窗口

（9）Properties（属性）：选择此命令后再单击 C7 Results 表格，此时会在 Workbench 17.0 平台右侧弹出图 2-15 所示的 Properties of Schematic C7：Results 对话框，对话框里面显示的是 C7 Results 栏中的相关信息，此处不再赘述。

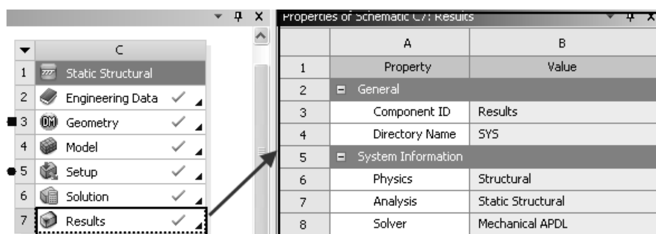


图 2-15　Properties of schematic C7：Results 窗口

3. Tools（工具）菜单

Tools（工具）菜单中的命令如图 2-16 所示，下面对 Tools 中的常用命令进行介绍。

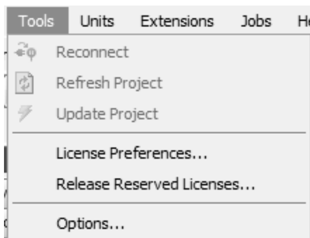


图 2-16　Tools 菜单

（1）Refresh Project（刷新工程数据）：当上行数据中内容发生变化，需要刷新板块（更新也会刷新板块）。

（2）Update Project（更新工程数据）：数据已更改，必须重新生成板块的数据输出。

（3）License Preference（参考注册文件）：选择此命令后，会弹出图 2-17 所示的 Releuse17. 0.2 License Preference for user xx 对话框。

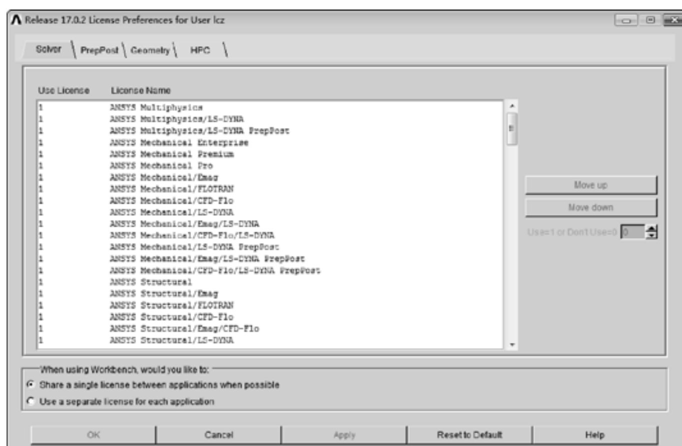


图 2-17　Releuse17. 0.2 License Preference for User xx 对话框

（4）Release Reserved Licenses…（关联注册信息）：选择此命令后，将弹出图 2-18 所示的 Release Reserved Licenses 对话框，用于远程求解计算时的密码设置。



图 2-18　Release Reserved Licenses 对话框

（5）Options（选项）：选择 Option 命令，弹出 Options 对话框，对话框中主要包括以下选项卡。

1）Project Management（项目管理）选项卡：在图 2-19 所示的 Project Management 选项卡中可以设置 Workbench 17.0 平台启动的默认目录和计算时的临时文件的位置、是否启动导读对话框及是否加载新闻信息、项目工程文件压缩等级等参数。

2）Appearance（外观）选项卡：在图 2-20 所示的 Appearance 选项卡中可对 Workbench 平台中的部分软件模块的背景颜色、文字颜色、几何图形的边等进行颜色设置，同时也可以

启动 Beta（测试）选项等，图 2-21 所示为启动 Beta 选项前后 Toolbox 选项卡中的对比。

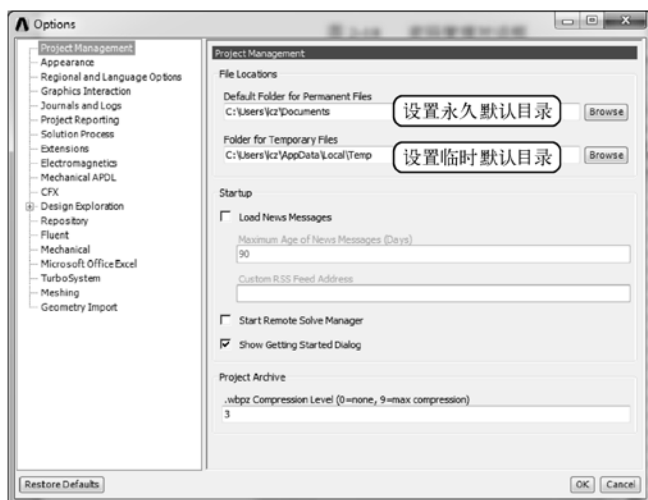


图 2-19　Project Management 选项卡

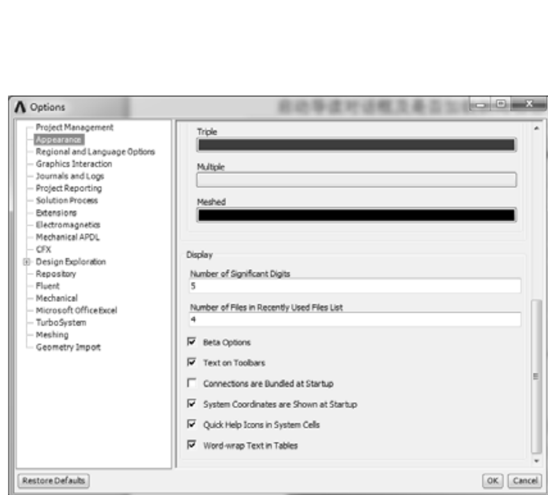


图 2-20　Appearance 选项卡

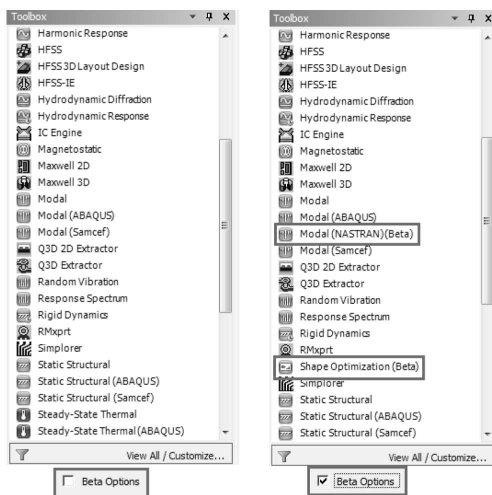


图 2-21　Beta 选项开启与否

3）Regional and Language Options（区域和语言选项）选项卡：通过图 2-22 所示的选项卡可以设置 Workbench 17.0 平台的语言，其中包括德语、英语、法语及日语四种。

4）Graphics Interaction（几何图形交互）选项卡：在图 2-23 所示的选项卡中可以设置鼠标对图形的操作，如平移、旋转、放大、缩小、多体选择等等操作，以常用的三键鼠标（见图 2-24）为例进行说明。

① Mouse Wheel（鼠标滚轮）：设置鼠标滚轮可以执行缩放（Zoom）操作或者无响应（None），默认为缩放（Zoom）操作；

② Middle Button（三键鼠标的中键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为旋转（Rotate）操作；

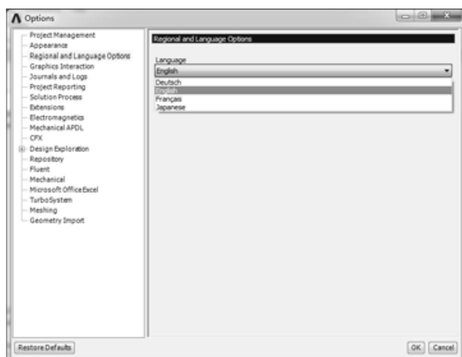


图 2-22　Regional and Language Options 选项卡

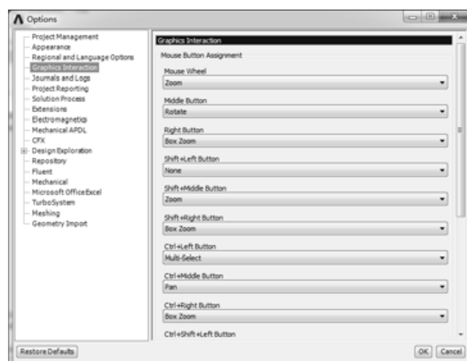


图 2-23　Graphics Interaction 选项卡

③ Right Button（三键鼠标的右键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为框选缩放（Box Zoom）操作；

④ Shift+Left Button（键盘的〈Shift〉键+三键鼠标的左键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为无响应（None）；



图 2-24　三键鼠标

⑤ Shift+Middle Button（键盘的〈Shift〉键+三键鼠标的中键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为缩放（Zoom）操作；

⑥ Shift+Right Button（键盘的〈Shift〉键+三键鼠标的右键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为框选缩放（Box Zoom）操作；

⑦ Ctrl+Left Button（键盘的〈Ctrl〉键+三键鼠标的左键）：可设置为多选（Multi-Select）、旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为多选（Multi-Select）操作；

⑧ Ctrl+Middle Button（键盘的〈Ctrl〉键+三键鼠标的中键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为平移（Pan）操作；

⑨ Ctrl+Right Button（键盘的〈Ctrl〉键+三键鼠标的右键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为框选缩放（Box Zoom）操作；

⑩ Ctrl+Shift+Left Button（键盘的〈Ctrl+Shift〉组合键+三键鼠标的左键）：可设置为多选（Multi-Select）及无响应（None），默认为无响应（None）；

⑪ Dynamic Viewing During Rotation（转动时动态视觉效果）：若勾选此复选框，当转动几何时，将可以动态观察视觉效果；

⑫ Extend Selection Angle Limit（扩展选中角度限制）：默认为 20°，读者可以根据几何

特点更改此角度，以方便几何选择时的扩展应用；

⑬ Angle Increment for Configure Tool（角度增量配置工具）：默认为 10°，读者可根据需要调整角度增量值。

5）Journal and Logs（日志）选项卡：单击此选项卡，在右侧将显示录制脚本语言的默认文件路径，同时也可设置 Log（日志）文件路径及日志文件保存的时间，如图 2−25 所示。

6）Solution Process（求解过程）选项卡：设置求解过程中一些显示及处理，有如下几个命令，如图 2−26 所示。

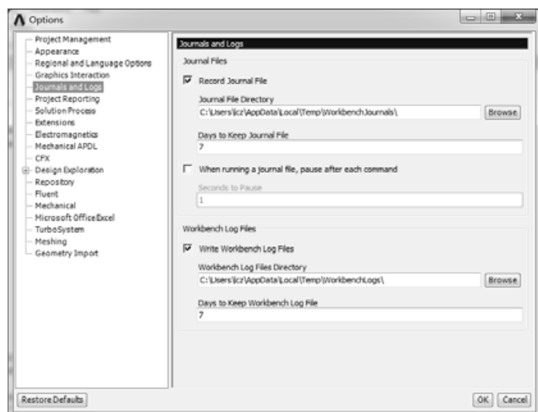


图 2−25 Journal and Logs 选项卡

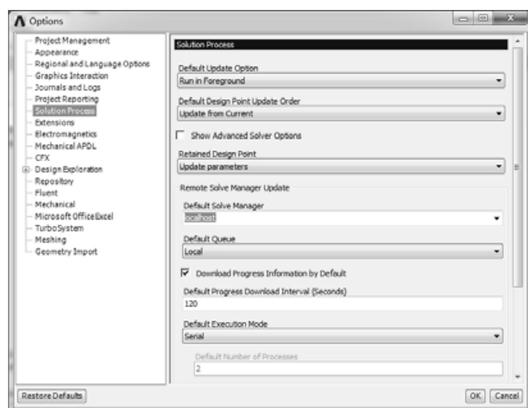


图 2−26 Solution Process 选项卡

① Default Update Option（默认更新选项）：包括 Run in Foreground（运行在前端）、Run in Background（运行在后台）及 Submit to Remote Solve Manager（提交远程求解管理器）三个选项，默认为 Run in Foreground（运行在前端）；

② Default Design Point Update Order（默认设计节点更新序列）：包括 Update from Current（从当前开始更新）及 Update Design Points in Order（按顺序更新设计点），默认为 Update from Current（从当前开始更新）；

③ Show Advanced Solver Options（显示高级求解器选项）：是否显示高级求解器选项；

④ Retained Design Point（保留设计点）：包括 Update parameters（更新参数）及 Update full project（更新所有项目文件）两个选项；

⑤ Default Execution Mode（默认执行模式）：包括 Serial（顺序模式）和 Parallel（并行模式）两种类型，当选中并行模式后，下面的 Default Number of Processes（默认处理器数量）被激活，此时可根据 CPU 的数量设置并行计算所使用 CPU 的数量；

7）Extensions（扩展）选项卡：在扩展选项卡中用户可以将自己编写的并编译成*.wbex 格式程序代码目录添加到 Additional Extension Folders（添加外部文件夹路径），如果有多个文件夹，则中间用分号（；）隔开即可，如图 2−27 所示，添加了一个文件路径；在 Save Binary Extensions with Project（将二进制扩展文件保存到工程项目），可以选择是否保存。这部分内容在后面有介绍，这里不再赘述。

8）Electromagnetics（电磁分析）选项卡：在图 2−28 所示的选项卡中可以添加像 HFSS、Maxwell、Simplorer、Designer 及 Q3D Extractor 软件启动程序目录，当 ANSYS Electromagnetics

Suite 17.0 电磁软件模块安装完成后，此文件路径自动被添加到相应的目录中。

其中的 Journal Recording Language（脚本录制语言）可以设置使用 IronPython 或者 VBS 语言格式来录制电磁分析时的脚本文件。

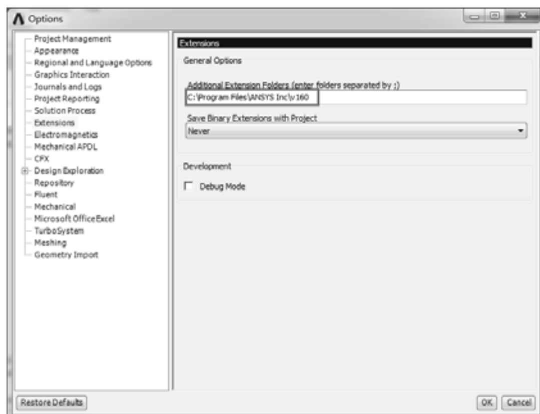


图 2-27　Extensions 选项卡

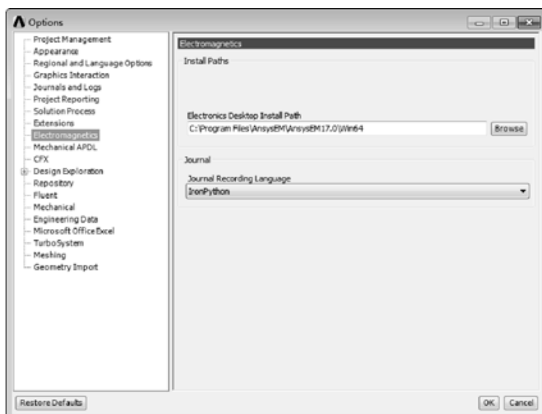


图 2-28　Electromagnetics 选项卡

9）Mechanical APDL（ANSYS APDL 分析平台）选项卡：在图 2-29 所示的选项卡中可以设置 Command Line Option（命令行选项）、Database Memory（数据库内存大小）、Workspace Memory（工作目录内存使用量）、Processors（处理器个数）及是否开启 GPU 加速选项等；

10）CFX（CFX 流体动力学分析模块）选项卡：在 Solution Defaults（默认求解器设置）栏中有图 2-30 所示的 Keep Latest Solution Data Only（仅保持最近求解器数据）和 Cache Solution Data（求解数据缓冲）两个复选框。

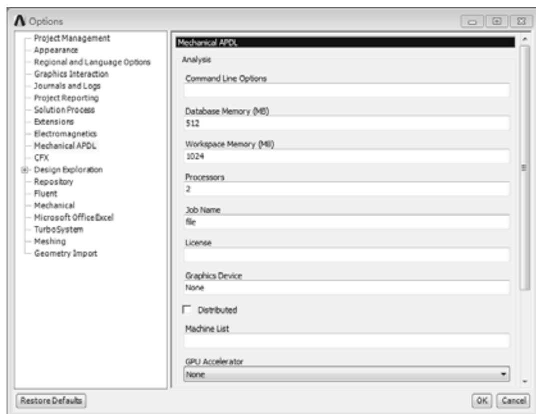


图 2-29　APDL 选项卡

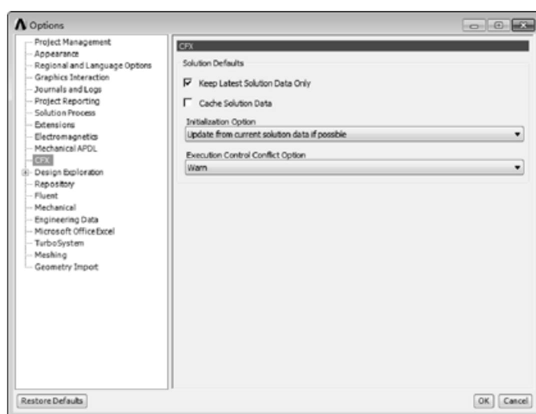


图 2-30　CFX 选项卡

在 Initialization Option（初始化选项）选择栏中可以设置初始化选项，即 Automatic（自动的）、Update from current solution data if possible（更新当前可用的结果数据）、Update from cache solution data if possible（更新缓冲区可用的结果数据）和 Update from initial condition（从初始化更新）四个选项。

在 Execution Control Conflict Option（执行控制冲突选项）选择栏中可以选择不同的方式来设置默认的执行命令，以控制冲突选项，包括 Warn（警告）、Use Setup Cell Execution Control（使用建立 Setup 执行控制）和 Use Solution Cell Execution Control（使用建立 Solution 执行控制）三个选项。

11）Design Exploration（设计开发）选项卡：如图 2-31 所示，选项卡中包括 Show Advanced Options（是否显示高级选项），在 Design Points（设计点）下面有 Preserve Design Points After DX Run（在 DX 运行完成后是否保存设计节点），如果勾选，则 Retain Data Design for Each Preserved Design Point（为每个保存的设计节点保留数据设计点）将被激活；当 Retry All Failed Design Points（重试所有失败设计节点）被勾选时，可以在下面设置 Number of Retries（重试次数）和 Retry Delay（重试延时时间，单位为秒）等，在设计开发选项卡下面有三个子选项卡。

① Design of Experiments（实验设计）选项卡：在图 2-32 所示的实验设计选项卡中可以对 Design of Experiments Type（实验设计类型）进行选择，有如下四个选项。

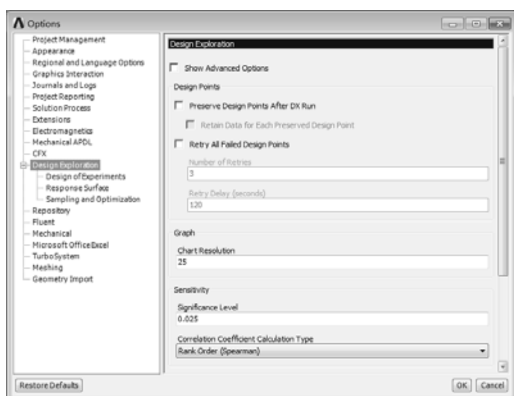


图 2-31 Design Exploration 选项卡

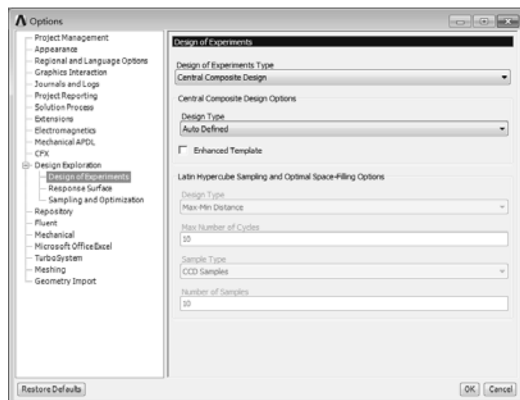


图 2-32 Design of Experiments 选项卡

- Central Composite Design（中心复合试验设计，简称 CCD）：中心复合实验设计是在二水平权因子和分部实验设计的基础上发展出来的一种实验设计方法，它是二水平全因子和分部实验设计的拓展。通过对二水平实验增加一个设计点（相当于增加了一个水平），从而可以对评价指标（输出变量）和因素间的非线性关系进行评估。它常用于在需要对因素的非线性影响进行测试的实验；当选择 CCD 时，下面的选项卡中有五种实验类型：Auto Defined（自动定义）、G-Optimality（G 优化设计）、VIF-Optimality（VIF 优化设计）、Rotatable（旋转性设计）和 Face-Centered（面心设计）五种。
- Optimal Space-Filling Design（最佳的空间填充设计）：在整个设计空间均匀分布，空间填充能力强，适用于后续的 Kriging、Non-arametricRegression、Neural Networks 的响应面类型，为了节省计算时间，可以指定样本数，样本有可能没有落在角落及中点；当选择 Optimal Space-Filling Design 选项时，下面的 Latin Hypercube Sampling and Optimal Space-Filling Design 栏的类型中有如下三个选项：Max-Min Distance（最大-最小距离）、Centered L2（中心化 L2）和 Maximum Entropy（最大熵）；在样本类型栏中有以下五个样本类型选项：CCD Sample（中心复合实验设计样本）、Linear Model Samples

（线性模型样本）、Pure Quadratic Model Samples（纯二次模型样本）、Full Quadratic Model Samples（完全二次模型样本）及 User Defined Samples（用户定义样本），最后一栏中设置样本数量。

- Box-Behnken Design（Box-Behnken 实验设计）：Box-Behnken 实验设计是可以评价指标和因素间的非线性关系的一种实验设计方法。与中心复合设计（CCD）不同的是，它不需要连续进行多次实验，并且在因素数相同的情况下，Box-Behnken 实验的实验组合数比中心复合设计（CCD）少因而经济。Box-Behnken 实验设计常用于在需要对因素的非线性影响进行研究的实验。
- Latin Hypercube Sampling Design（拉丁超立方抽样设计）：计算机实验中广泛采用的一种设计是拉丁超立方设计。一个包含 n 次试验和 m 个变量的拉丁超立方设计可以用一个 n×m 矩阵表示，其中每一列都是向量(1，2，…，n)的一个置换，称一个拉丁超立方设计为正交拉丁超立方设计。

② Response Surface（响应曲面）子选项卡：在图 2-33 所示的选项卡中可以设置相应曲面的类型，有 Standard Response Surface-Full 2nd Order Polynomials（标准响应曲面-完全二阶多项式模型）、Kriging（克里金模型）、Non-Parametric Regression（非参数回归模型）及 Neural Network（神经网络模型）；当选择 Kriging 时，下面的 Kriging Option（克里金选项）被激活，在 Kernel Variation Type（内核变量类型）中有 Variable Kernel Variation（变量内核变动）和 Constant Kernel Variation（常量内核变动）两种选项卡。

③ Sampling and Optimization（抽样和优化）子选项卡：在图 2-34 所示的抽样和优化子选项卡中可以设置 Random Number Generation（随机数生成）是否为 Repeatability（可重复性），Weighted Latin Hypercube（加权拉丁超立方模型）的 Sampling Magnification（抽样放大率）的数量，在 Optimization（优化）栏中的 Constraint Handling（约束方式）栏中可以选择 Strict（精确的）和 Relaxed（非精确的）两种选项。

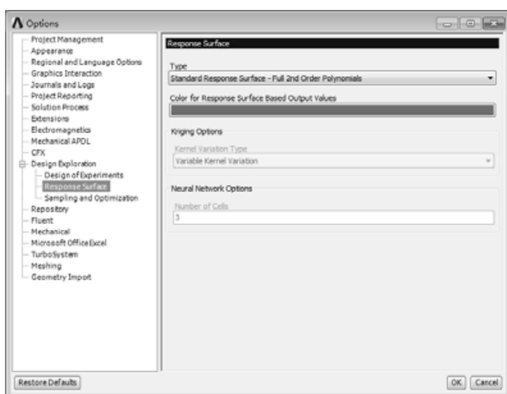


图 2-33　Response Surface 选项卡

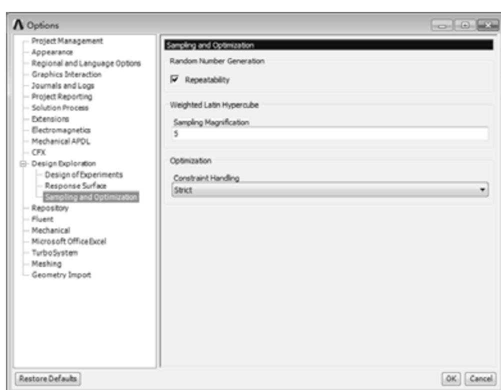


图 2-34　Sampling and Optimization 选项卡

12）Fluent（流体动力学）选项卡：在图 2-35 所示的 Fluent 分析模型软件设置选项卡中，可以完成 Fluent 软件的相关设置并设置为启动默认项，如在 General Options（一般选项中）可以设置在编辑计算时是否显示一些警告、启动新的计算时是否自动删除原来的结果，在 Default Options for New Fluent System（新建 Fluent 系统的默认设置）中可以设置在启动程序的时候显示启动栏、读完数据后是否显示网格、是否将 Fluent 的 GUI 界面嵌入到窗口

中、是否应用 Workbench 统一的颜色方案及是否同时启动 UDF 编译环境，同时也可以设置 Precision（计算精度）是 Single Precision（单精度）还是 Double Precision（双精度），在 Setup Cell 中选择是否同时产生输出的 case 文件，在 Solution 中选择显示求解过程中的监视及是否产生一个可以被改写的文件。

13）Mechanical 选项卡：在图 2−36 所示的 Mechanical 选项卡中可以设置关联几何数据模型后是否自动删除接触、并行计算的最大使用内核数量等。

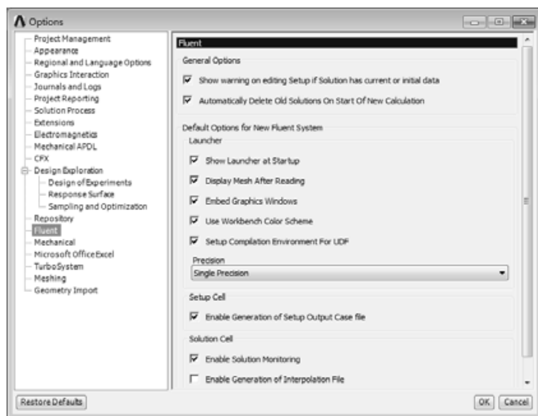


图 2−35 Fluent 选项卡

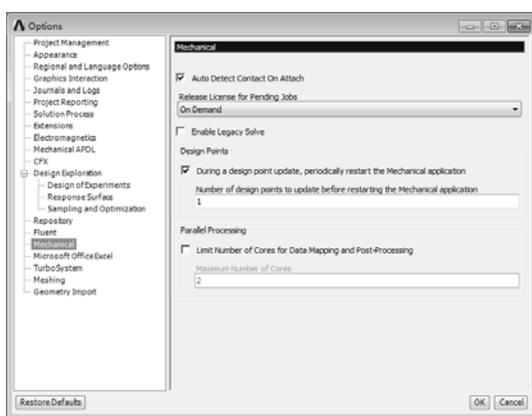


图 2−36 Mechanical 选项卡

14）Microsoft Office Excel 选项卡：在图 2−37 所示的 Microsoft Office Excel 选项卡中可以设置变量数据名的前缀过滤格式。

15）Geometry Import（几何导入）选项卡：在图 2−38 所示的选项卡中可以选择几何建模工具，即 DesignModeler 和 SpaceClaim Direct Modeler；SpaceClaim Preferences（SpaceClaim 偏好设置）可以设置是否将 SpaceClaim 直接建模软件作为外部 CAD 软件。

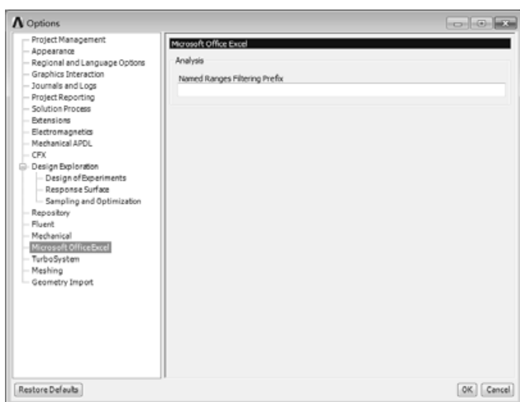


图 2−37 Microsoft OfficeExcel 选项卡

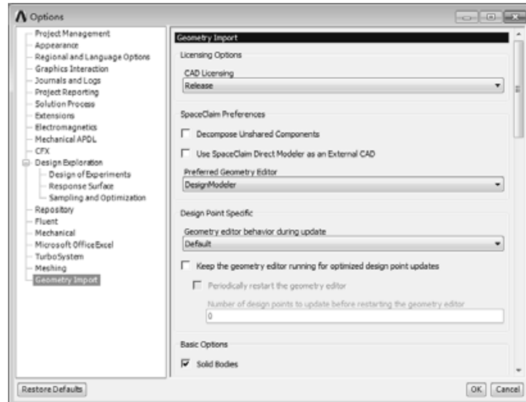


图 2−38 Geometry Import 选项卡

这里仅仅对 Workbench 17.0 平台与建模及分析相关并且常用的选项进行简单介绍，其余选项请读者参考帮助文档的相关内容。

4. Units（单位）菜单

如图 2−39 所示，在此菜单中可以设置国际单位、米制单位、美制单位及用户自定义单

位，选择 Unit Systems（单位设置系统）选项，在弹出的图 2−40 所示的 Unit Systems 对话框中可以制定用户喜欢的单位格式。

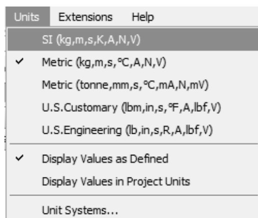


图 2−39　Units 菜单



图 2−40　Unit Systems 对话框

5. Extensions（扩展）菜单

图 2−41 所示的扩展菜单是 ANSYS Workbench 17.0 平台中新增加的模块，在模块中可以添加 ACT（客户化应用工具套件）。



图 2−41　扩展菜单

单击子菜单 ACT Start Page，弹出图 2−42 所示的选项卡，单击 Wizards 按钮，将出现通过向导导入已经建立好的 ACT 插件格式的模块；单击 Extension Manager（插件管理器）按钮，将弹出图 2−42 右侧出现的管理器窗口，在窗口中单击未激活的插件（颜色为灰色，将鼠标放置于按钮上将显示“Click to load extension”提示信息）按钮，此时灰色的按钮将变成绿色，表示该插件模块已经被成功加载。如果读者想加载新的插件模块，单击 Extension Manager 窗口中右侧的“＋”即可，如果想建立新的文件夹目录，单击“＋”右侧的⚙按钮即可。

6. Jobs（作业）菜单

通过作业菜单，可以设置远程提交的作业文件及检测显示等信息。

7. Help（帮助文档）菜单

在帮助菜单中，软件可实时地为用户提供软件操作及理论上的帮助。



图 2-42 ACT 控制

2.1.3 工具栏

Workbench 17.0 的工具栏如图 2-43 所示，命令已经在前面菜单中出现，这里不再赘述。



图 2-43 工具栏

2.1.4 工具箱

Toolbox（工具箱）位于 Workbench 17.0 平台的左侧，图 2-44 所示为 Toolbox（工具箱）中包括四个基本分析系统模块和一个插件分析模块。

（1）下面针对上述四个基本分析系统模块简要介绍其包含的内容。

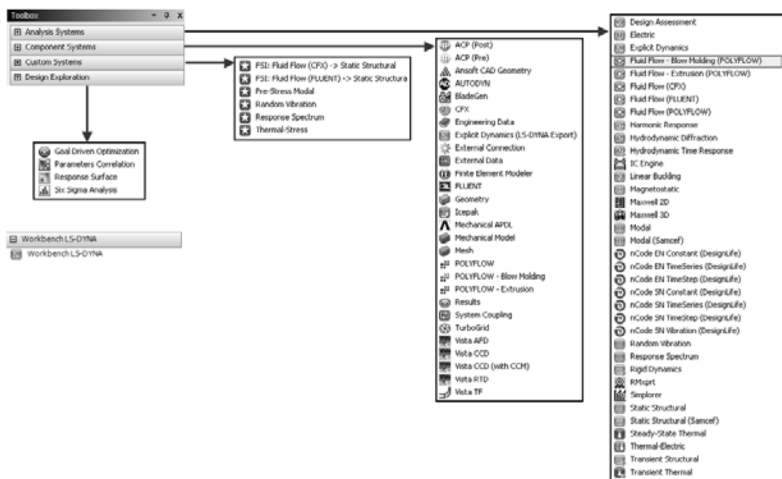


图 2-44 Toolbox（工具箱）

- Analysis Systems（分析系统）：分析系统中包括不同的分析类型，如静力分析、热分析、流体分析等，同时模块中也包括用不同种求解器求解相同分析的类型，如静力分析就包括用 ANSYS 求解器分析和用 SAMCEF 求解器两种。图 2-45 为分析系统中所包含的分析模块的说明。

注：在 Analysis Systems（分析模块）中需要单独安装的分析模块有 Maxwell 2D（二维电磁场分析模块）、Maxwell 3D（三维电磁场分析模块）、RMxprt（电机分析模块）、Simplorer（多领域系统分析模块）及 nCode（疲劳分析模块）。读者可单独安装此模块。

- Component Systems（组件系统）：组件系统包括应用于各种领域的几何建模工具及性能评估工具，组件系统包括的模块如图 2-46 所示。

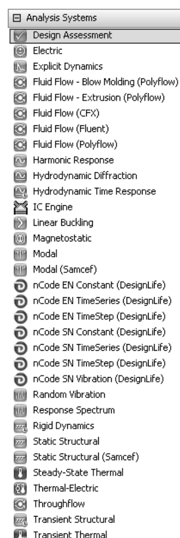


图 2-45 Analysis Systems（分析系统）

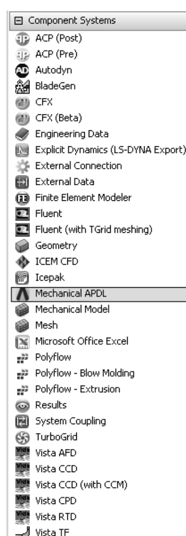


图 2-46 Component Systems（组件系统）

- Custom Systems（用户自定义系统）：在图 2-47 所示的用户自定义系统中，除了有软件默认的几个多物理场耦合分析工具外，Workbench 17.0 平台还允许用户自己定义常用的多物理场耦合分析模块。
- Design Exploration（设计优化）：图 2-48 所示为设计优化模块，在设计优化模块中允许用户利用以下五种工具对零件产品的目标值进行优化设计及分析。

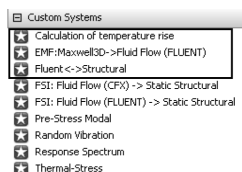


图 2-47 Custom Systems（用户自定义系统）

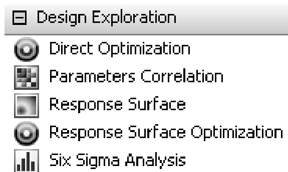


图 2-48 Design Exploration（设计优化）

（2）外接插件分析模块。Workbench 分析平台以其易用性及良好的兼容性，除了被广大用户广泛学习和使用外，还被一些程序生产厂商作为一个接口平台，将程序集成到

Workbench 平台中进行扩展分析，如图 2-49 所示。

- 法国达索公司的 SIMULIA Tosca Structure 无参数结构优化软件开发了基于 Workbench 平台的接口程序——Tosca Extension for ANSYS Workbench，仅需要通过 Extension 接口即可将 Tosca Structure 外接程序接口集成到 Workbench 平台中进行结构的优化分析；
- 英国的 DEM——Solutions 公司为其主打的离散元计算程序开发了基于 Workbench 平台的插件程序——EDEM Add-In for ANSYS® Workbench™，通过此接口模块能将离散元 EDEM 程序计算的粒子与 Workbench 平台中的结构分析模块进行单项耦合受力分析；
- Workbench LS-DYNA（显示动力学分析模块）：在显示动力学分析模块中程序将使用 LS-DYNA 求解器对模型进行显示动力学分析，这个模块需要用户单独安装插件。



图 2-49　外接口程序模块

下面用一个简单的实例来说明如何在用户自定义系统中建立用户自己的分析模块。

Step1：启动 Workbench 17.0 后，单击左侧 Toolbox（工具箱）→Analysis System（分析系统）中的 Maxwell 3D（三维电磁场分析模块）不放，直接拖曳到 Project Schematic（工程项目管理窗口）中，如图 2-50 所示，此时会在 Project Schematic（工程项目管理窗口）中生成一个如同 Excel 表格一样的 Maxwell 3D Design 分析流程图表。

注：Maxwell 3D Design 分析图表显示了执行 Maxwell 3D Design 流体分析的工作流程，其中每个单元格命令代表个一个分析流程步骤。根据 Maxwell 3D Design 分析流程图标从上往下执行每个单元格命令，就可以完成流体的数值模拟工作，具体流程为：

- A2：Geometry 得到模型几何数据、进行网格的控制与剖分；
- A3：Setup 进行边界条件的设定与载荷的施加；
- A4：Solution 进行分析计算。

Step2：双击 Analysis System（分析系统）中的 Geometry（几何）模块和 Icepak（流体分析）模块，此时会在 Project Schematic（工程项目管理窗口）中的项目 A 下面生成项目 B 和项目 C，如图 2-51 所示。

Step3：双击 Component System（组件系统）中的 Feedback Iterator（反馈插值）模块，此时会在 Project Schematic（工程项目管理窗口）中的项目 A 右侧生成项目 B，如图 2-52 所示。



注意：此时模块单元的排列顺序将发生变化，请读者自己对比。

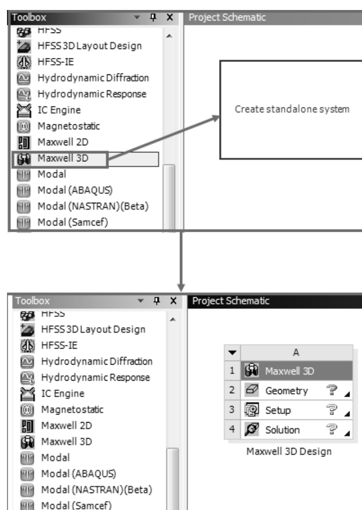


图 2-50 创建电磁场分析项目

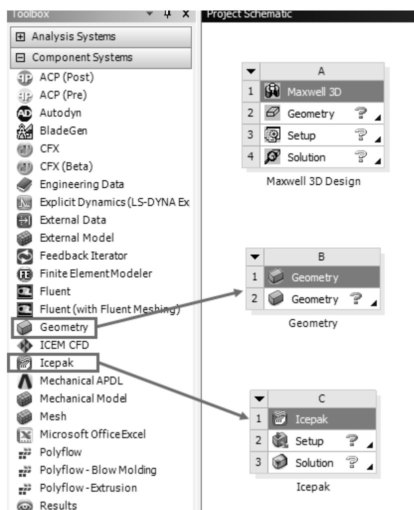


图 2-51 创建结构分析项目

Step4： 创建好四个模块后，单击 A2：Geometry 不放，直接拖曳到 C2：Geometry 中，如图 2-53 所示。



图 2-52 插值反馈模块

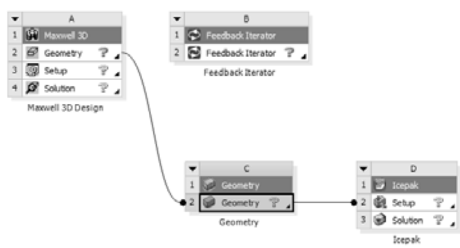


图 2-53 工程数据传递

Step5： 同样操作，将 C2：Geometry 拖曳到 D2：Setup，将 A4：Solution 拖曳到 D2：Setup，将 A3:Setup 直接拖曳到 B2：Feedback Iterator 中，操作完成后项目连接形式如图 2-54 所示，此时在项目 A 和项目 D 中的 Solution 表中的图标变成了，即实现了项目 A 和项目 D 的双向耦合计算。

注：在工程分析流程图表之间如果存在（一端是小正方形），表示数据共享；工程分析流程图表之间如果存在（一端是小圆点），表示实现数据传递。

Step6： 在 Workbench 17.0 平台的 Project Schematic（工程项目管理窗口）中单击右键，在弹出的图 2-54 所示的快捷菜单中选择 Add to Custom（添加到用户）命令。

Step7： 在弹出的图 2-55 所示的 Add Project Template（添加工程模版）对话框中输入名

称为“Maxwell to Icepak for 2 ways Solution”并单击 OK 按钮。

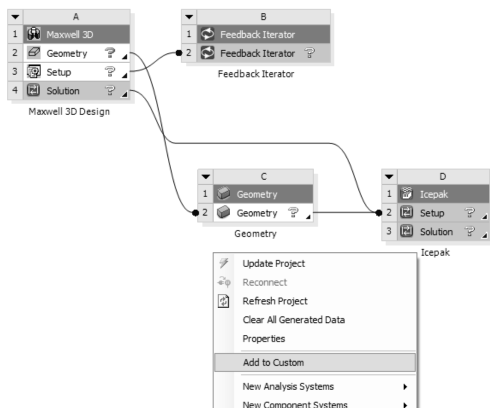


图 2-54　快捷菜单

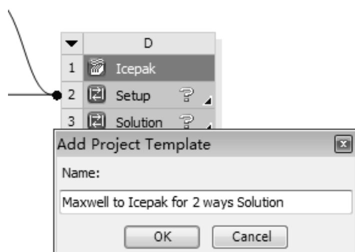


图 2-55　Add Project Template 对话框

Step8：完成用户自定义的分析模板添加后，单击 Workbench 17.0 左侧 Toolbox 下面 Custom System 前面的+，如图 2-56 所示，刚才定义的分析模板已被成功添加到 Custom System 中。

Step9：选择 Workbench 17.0 平台 File 菜单中的 New 命令，新建立一个空项目工程管理窗口，然后双击 Toolbox 下面的 Custom System→Maxwell to Icepak for 2 ways Solution 模板，此时 Project Schematic 窗口中将出现图 2-57 所示的分析流程。

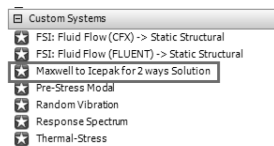


图 2-56　用户定义的分析流程模板

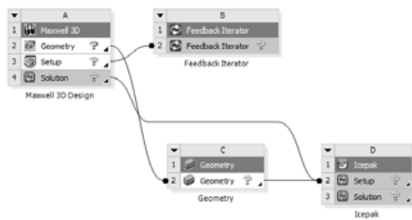


图 2-57　加载自定义模板

注：分析流程图表模板建立完成后，要想进行分析还需要添加几何文件及边界条件等，以后章节一一介绍，这里不再赘述。

ANSYS Workbench 安装完成后，系统自动创建了部分用户自定义系统。

2.2　DesignModeler 17.0 几何建模

早期的有限元都是采用面向流程的分析方法，即通过编程实现有限元的仿真计算，这种方法不仅效率低下，最重要的是它非常容易出错，并且不易检查，一旦分析出来的结果出现了错误，需要逐行代码进行分析，浪费了大量的时间。

随着计算机技术的进步，可视化技术也得到了飞速的发展，现在的有限元分析方法均采

用界面友好、可视化程度极高的面向对象的结构，不仅省去了编程的痛苦，还可以通过对绘图窗口中的操作步骤显示，对每一步的操作进行检查校准；有限元分析的一般过程也由原来单调的编程升级到现在的几何建模、材料设置、网格划分、边界条件选择、计算及后处理。

有限元分析的第一个重要的工程就是几何建模，几何建模直接影响到最后一步的计算结果的正确性，是一个合理有限元分析过程中的重中之重。一般在整个有限元分析的过程中，几何建模的工作量占据了非常多的时间，同时也是非常重要的一步。

本节将着重讲述利用 ANSYS Workbench 自带的几何建模工具——DesignModeler 进行几何建模。

2.2.1 DesignModeler 几何建模平台

在 ANSYS Workbench 平台中，依次选择 Toolbox→Component Systems 下面的 Geometry 模块并双击，此时在右侧的 Project Schematic 中出现 Geometry 单元，如图 2-58 所示。

注：在 Analysis Systems 下面双击任意一个模块选项出现的分析流程选项卡中也可以建立 Geometry。

双击 A2：Geometry 进入图 2-59 所示的 DesignModeler 平台界面，如同其他 CAD 软件（如 Creo、SolidWorks、UG、SolidEdge、CAXA 实体建模及 CATIA 等）一样，DesignModeler 平台包括以下几个关键部分：菜单栏、工具栏、绘图窗口、模型树及命令树、属性详细设置窗口等。在几何建模之前先对常用的命令及菜单进行详细介绍。

注：DesignModeler 平台虽然具有与其他 CAD 软件相似的几何建模功能，但是读者需要了解的一个重点是：DesignModeler 的强大之处在于它对几何的修复，这也是其他 CAD 建模工具所无法比拟的重要特点，DesignModeler 对其他 CAD 建模的模型通过中间格式（如 *.igs、*.step、*.x_t 等）进行导入，当模型很复杂时，在中间的格式转化时会出现模型缺陷，这时需要通过 DesignModeler 平台中的工具对几何模型进行修复，以保证后期有限元分析的正确性。

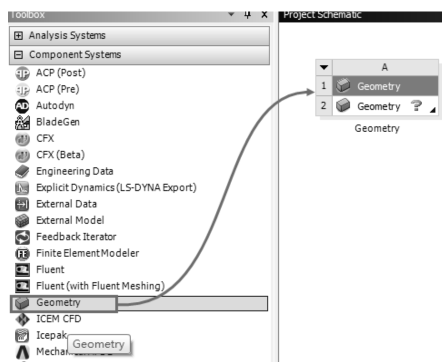


图 2-58 Geometry 创建

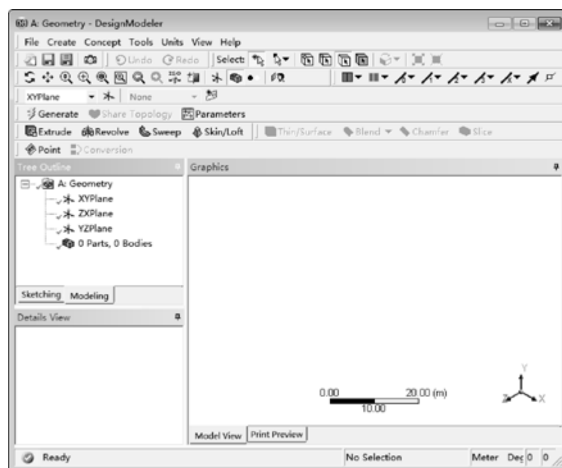


图 2-59 DesignModeler 平台

2.2.2 菜单栏

菜单栏中包括 File（文件）、Create（创建）、Concept（概念）、Tools（工具）、Units（单位）、View（视图）及 Help（帮助）七个基本菜单。

1．File（文件）菜单

File（文件）菜单中的命令如图 2-60 所示，下面对 File（文件）菜单中的常用命令进行简单介绍。

- Refresh Input（刷新输入）：当几何数据发生变化时，选择此命令可以保持几何文件同步。
- Start Over（新建一个绘图）：如果当前绘图程序里面有几何模型，将提示是否清理模型并重新启动程序，单击 Yes 按钮，则启动一个新的建模程序，单击 No 按钮，则留在当前界面。
- Load DesignModeler Database（载入 DesignModeler 数据文件）：弹出对话框用以加载 DM 建立的几何模型。
- Save Project（保存工程文件）：选择此命令保存工程文件，如果是新建立未保存的工程文件，Workbench 17.0 平台会提示输入文件名。
- Export（几何输出）：选择 Export 命令后，DesignModeler 平台会弹出图 2-61 所示的“另存为”对话框，在对话框的保存类型中，读者可以选择喜欢的几何数据类型。

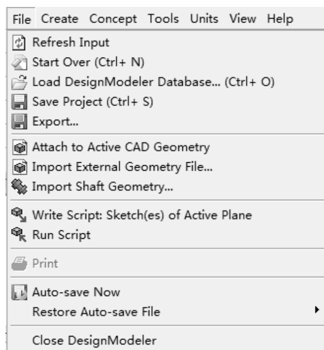


图 2-60 File 菜单



图 2-61 “另存为”对话框

- Attach to Active CAD Geometry（动态链接开启的 CAD 几何）：选择此命令后，Design Modeler 平台会将当前活动的 CAD 软件中的几何数据模型读入图形交互窗口中。

注：如果在 CAD 中建立的几何文件未保存，DesignModeler 平台无法读取当前处于打开状态 CAD 软件的几何文件模型。

- Import External Geometry File（导入外部几何文件）：选择此命令，在弹出的图 2-62 所示的对话框可以选择所要读取的文件名，此外，DesignModeler 平台支持的所有外部文件格式在“打开”对话框中的文件类型中被列出。
- Import Shaft Geometry（导入轴类几何文件）：导入*.txt 格式的轴类几何文件，文件中的内容以梁单元形式给出，图 2-63 所示的 shaft.txt 文档中包含以下内容，第一列为



转子的分段数，第二列为每段转子的轴向长度，第三列为转子的外直径，第四列为转子的内直径。通过 Import Shaft Geometry 选项将 shaft.txt 导入 Geometry 平台后，显示截面实体模型后的效果如图 2-63 下图所示。



图 2-62 “打开”对话框



Statioin	Length	Outer Diameter	Inner Diameter
1	2.34	1.53	0
2	5.27	0.98	0
3	4.75	2.66	0
4	2.34	3.21	0
5	2.34	3.48	0
6	0.72	3.48	0
7	1.75	2.97	2.05
8	1.03	1.49	0.77
9	5.27	1.49	0
10	4.75	1.78	0
11	2.34	4.80	0

图 2-63 shaft.txt 和转子模型

- Write Script：Sketch（es）of Active Plane（写脚本）：单击此选项，此时弹出保存脚本文件名对话框，默认格式为*.js（java script），另外还可以选择*.anf（ANSYS Neural File）格式。在 XY 平面上建立一个草绘，例如正六边形（见图 2-64），建立完成后选择 Write Script：Sketch（es）of Active Plane 选项，并将文件名保存为 script_ex1.js，打开 script_ex1.js 文件后可以查看在 XY 平面上建立的正六边形过程的脚本记录，如图 2-65 所示。

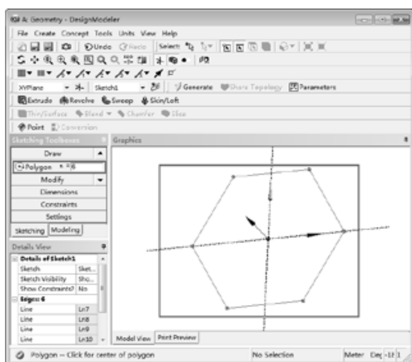


图 2-64 草绘

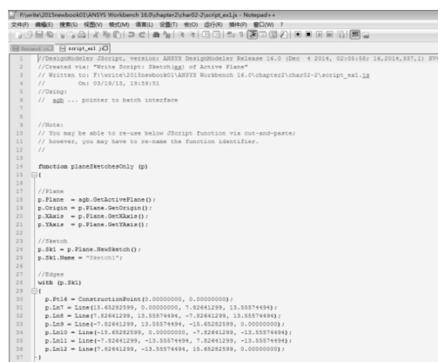


图 2-65 脚本

- Run Script（运行脚本）：单击此选项后，将弹出运行已经保存的脚本文件，如果运行成功，将会读入脚本中的相关操作，如将上例的脚本导入 Geometry 平台中的操作为：选择 Run Script 选项，在弹出的“打开”对话框中选择 script_ex1.js 文件，单击“打开”按钮，此时会把正六边形的草绘导入 Geometry 平台中。

注：操作多次 Run Script 命令，Geometry 将会把每一次的 Run Script 都导入 Geometry 中，所以执行 Run Script 操作时，读者务必注意。

其余命令这里不再讲述，请读者参考帮助文档的相关内容。

2．Create（创建）菜单

Create（创建）菜单如图 2−66 所示，Create 菜单中包含对实体操作的一系列命令，包括实体拉伸、倒角、放样等操作，下面对 Create（创建）菜单中的实体操作命令进行简单介绍。

（1）New Plane（创建新平面）：选择此命令后，会在 Details View 窗口中出现图 2−67 所示的平面设置面板，在 Details of Plane4→Type 中显示了 8 种设置新平面的类型。

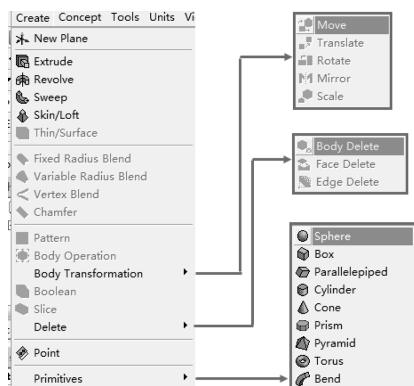


图 2−66　Create 菜单

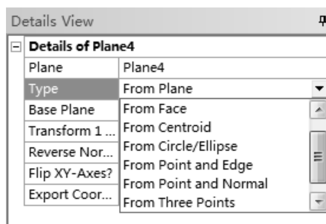


图 2−67　新建平面设置面板

- From Plane（以平面）：从已有的平面中创建新平面。
- From Face（以一个表面）：从已有的表面中创建新平面。
- From Centroid（以几何中心）：从一个已有几何的中心创建新平面。
- From Circle/Ellipse（以圆形/椭圆形）：从已有的圆形或者椭圆形创建新平面。
- From Point and Edge（以一点和一条边）：从已经存在的一条边和一个不在这条边上的点创建新平面。
- From Point and Normal（以一点和法线方向）：从一个已经存在的点和一条边界方向的法线创建新平面。
- From Three Points（以三点）：从已经存在的三个点创建一个新平面。
- From Coordinates（以坐标系）：通过设置与坐标系相对位置来创建新平面。

当选择以上 8 种中的任何一种方式来建立新平面，Type 下面的选项会有所变化，具体请参考帮助文档。

（2）Extrude（拉伸）：如图 2−68 所示，本命令可以将二维平面图形拉伸成三维立体图形，即对已经草绘完成的二维平面图形沿着二维图形所在平面的法线方向进行拉伸操作。

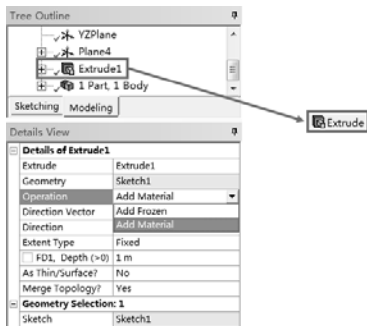


图 2−68　拉伸设置面板

在 Operation 选项中可以选择两种操作方式。

- Add Material（添加材料）：与常规的 CAD 拉伸方式相同，这里不再赘述。
- Add Frozen（添加冻结）：添加冻结零件，后面会提到。

在 Direction 选项中有四种拉伸方式可以选择。

- Normal（普通方式）：默认设置的拉伸方式。
- Reversed（相反方向）：此拉伸方式与 Normal 方向相反。
- Both-Symmetric（双向对称）：沿着两个方向同时拉伸指定的拉伸深度。
- Both-Asymmetric（双向非对称）：沿着两个方向同时拉伸指定的拉伸深度，但是两侧的拉伸深度不相同，需要在下面的选项中设定。

在 As Thin/Surface 选项中选择拉伸是否薄壳拉伸，如果在选项中选择 Yes，则需要分别输入薄壳的内壁和外壁厚度。

（3）Revolve（旋转）：选择此命令后，出现图 2-69 所示旋转操作面板。

在 Geometry（几何）中选择需要做旋转操作的二维平面几何图形；在 Axis（旋转轴）中选择二维几何图形旋转所需要的轴线；Operation、As Thin/Surface、Merge Topology 选项参考 Extrude 命令相关内容；

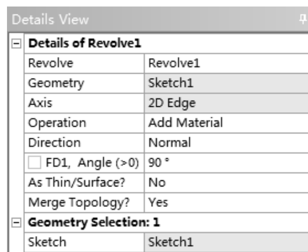
在 Direction 栏中输入旋转角度。

（4）Sweep（扫掠）：选择此命令后，弹出图 2-70 所示的扫略操作面板。

在 Profile（截面轮廓）中选择二维几何图形作为要扫掠的对象；在 Path（扫掠路径）中选择直线或者曲线来确定二维几何图形扫掠的路径；在 Alignment（扫掠调整方式）中选择按 Path Tangent（沿着路径切线方向）或者 Global Axes（总体坐标轴）两种方式；在 FD4,Scale（>0）中输入比例因子来扫掠比例；

在 Twist Specification（扭曲规则）中选择扭曲的方式，有 No Twist（不扭曲）、Turns（圈数）及 Pitch（螺距）三种选项。

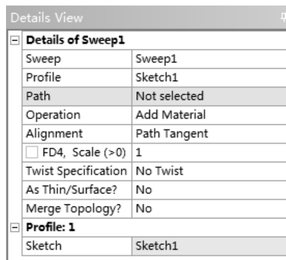
- No Twist（不扭曲）：即扫掠出来的图形是沿着扫掠路径的。
- Turns（圈数）：在扫掠过程中设置二维几何图形绕扫掠路径旋转的圈数；如果扫掠的路径是闭合环路，则圈数必须是整数；如果扫掠路径是开路，则圈数可以是任意数值。
- Pitch（螺距）：在扫掠过程中设置扫掠的螺距大小。



Details View

Details of Revolve1	
Revolve	Revolve1
Geometry	Sketch1
Axis	2D Edge
Operation	Add Material
Direction	Normal
FD1, Angle (>0)	90 °
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes
Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

图 2-69　旋转设置面板



Details View

Details of Sweep1	
Sweep	Sweep1
Profile	Sketch1
Path	Not selected
Operation	Add Material
Alignment	Path Tangent
FD4, Scale (>0)	1
Twist Specification	No Twist
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	No
Profile: 1	
Sketch	Sketch1

图 2-70　扫掠设置面板

（5）Skin/Loft（蒙皮/放样）：选择此命令后，弹出图 2-71 所示的蒙皮/放样操作面板。

在 Profile Selection Method（轮廓文件选择方式）栏中可以用 Select All Profiles（选择所有轮廓）或者 Select Individual Profiles（选择单个轮廓）两种方式选择二维几何图形；选择完成后，会在 Profiles 下面出现所选择的所有轮廓几何图形名称。

（6）Thin/Surface（抽壳）：选择此命令后，弹出图 2-72 所示的抽壳操作面板。

在 Selection Type（选择方式）栏中可以选择以下三种方式。

- Faces to Keep（保留面）：选择此选项后，对保留面进行抽壳处理。
- Faces to Remove（去除面）：选择此选项后，对选中面进行去除操作。
- Bodies Only（仅体）：选择此选项后，将对选中的实体进行抽空处理。

在 Direction（方向）栏中可以通过以下三种方式对抽壳进行操作。

- Inward（内部壁面）：选择此选项后，抽壳操作对实体进行壁面向内部抽壳处理。
- Outward（外部壁面）：选择此选项后，抽壳操作对实体进行壁面向外部抽壳处理。
- Mid-Plane（中间面）：选择此选项后，抽壳操作对实体进行中间壁面抽壳处理。

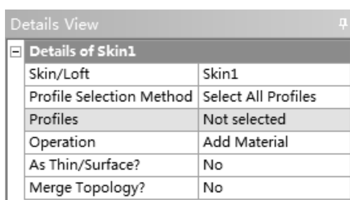


图 2-71　蒙皮设置面板

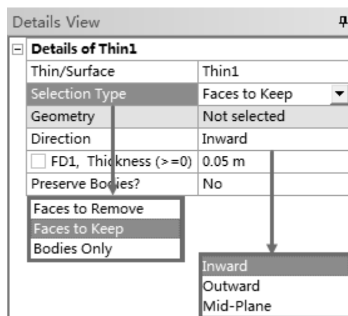


图 2-72　抽壳设置面板

（7）Fixed Radius Blend（确定半径倒圆角）：选择此命令，弹出图 2-73 所示的圆角设置面板。

在 FD1，Radius（>0）栏中输入圆角的半径；在 Geometry 栏中选择要圆角的棱边或者平面，如果选择的是平面，圆角命令将平面周围的几条棱边全部进行圆角外理。

（8）Variable Radius Blend（变化半径倒圆角）：选择此命令，弹出图 2-74 所示的圆角设置面板。

在 Transition（过渡）选项栏中可以选择 Smooth（平滑）和 Linear（线性）两种；

在 Edges（棱边）选项中选择要倒角的棱边；在 FD5，Start Radius（>=0）栏中输入初始半径大小；在 FD6，End Radius（>=0）栏中输入尾部半径大小。

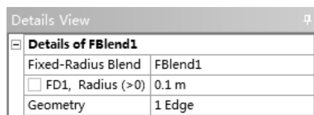


图 2-73　确定半径圆角设置面板

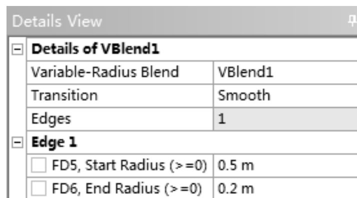


图 2-74　变化半径圆角设置面板

（9）Chamfer（倒角）：选择此命令会弹出图 2-75 所示的倒角设置面板。

在 Geometry 栏中选择实体棱边或者表面，当选择表面时，将表面周围的所有棱边全部倒角。

在 Type（类型）栏中有以下三种数值输入方式。

- Left−Right（左−右）：选择此选项后，在下面的栏中输入两侧的长度。
- Left−Angle（左−角度）：选择此选项后，在下面的栏中输入左侧长度和一个角度。
- Right−Angle（右−角度）：选择此选项后，在下面的栏中输入右侧长度和一个角度。

（10）Pattern（阵列）：选择此命令会弹出图 2−76 所示的阵列设置面板。

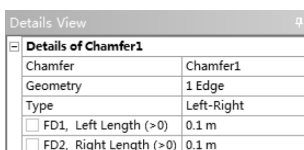


图 2−75　倒角设置面板

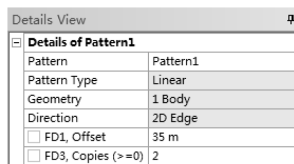


图 2−76　阵列设置面板

在 Pattern Type（阵列类型）栏中可以选择以下三种阵列样式：

- Linear（线性）：选择此选项后，阵列的方式将沿着某一方向阵列，需要在 Direction（方向）栏中选择要阵列的方向及偏移距离和阵列数量。
- Circular（圆形）：选择此选项后，阵列的方式将沿着某根轴线阵列一圈，需要在 Axis（轴线）栏中选择轴线及偏移距离和阵列数量。
- Rectangular（矩形）：选择此选项后，阵列方式将沿着两条相互垂直的边或者轴线阵列，需要选择两个阵列方向及偏移距离和阵列数量。

（11）Body Operation（体操作）：选择此命令会弹出图 2−77 所示的体操作设置面板。

在 Type（类型）栏中有以下几种体操作样式。

- Mirror（镜像）：对选中的体进行镜像操作，选择此命令后，需要在 Bodies（体）栏中选择要镜像的体，在 Mirror Plane（镜像平面）栏中选择一个平面，如 XYPlane 等。
- Move（移动）：对选中的体进行移动操作，选择此命令后，需要在 Bodies（体）栏中选择要镜像的体，在 Source Plane（源平面）栏中选择一个平面作为初始平面，如 XYPlane 等；在 Destination Plane（目标平面）栏中选择一个平面作为目标平面，两个平面可以不平行，本操作主要应用于多个零件的装配。
- Delete（删除）：对选中平面进行删除操作。
- Scale（缩放）：对选中实体进行等比例放大或者缩小操作，选中此命令后，在 Scaling Origin（缩放原点）栏中可以选择 World Origin（全局坐标系原点）、Body Centroids（实体的质心）及 Point（点）三个选项；在 FD1,Scaling Factor（>0）栏中输入缩放比例。
- Sew（缝合）：对有缺陷的体进行补片复原后，再利用缝合命令对复原部位进行实体化操作。
- Simplify（简化）：对选中材料进行简化操作。
- Cut Material（切材料）：对选中的体进行去除材料操作。
- Imprint Faces（表面印记）：对选中体进行表面印记操作。
- Slice Material（材料切片）：需要在一个完全冻结的体上执行操作，对选中材料进行材料切片操作。

- Clean Body（清除体）：对选中实体进行清除操作。
- Convert to NURBS（转化成 NURBS 曲线）：对选中实体进行实体转化操作。

（12）Boolean（布尔运算）：选择此命令会弹出图 2−78 所示的布尔运算设置面板。

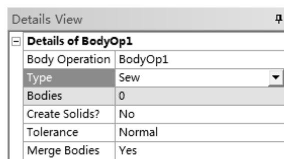


图 2−77　体操作设置面板

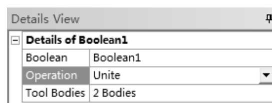


图 2−78　布尔运算设置面板

在 Operation（操作）选项中有以下四种操作选项。

- Unit（并集）：将多个实体合并到一起，形成一个实体，此操作需要在 Tools Bodies（工具体）栏中选中所有进行体合并的实体。
- Subtract（差集）：用一个实体（Tools Bodies）从另一个实体（Target Bodies）中去除；需要在 Target Bodies（目标体）中选择所要切除材料的实体，在 Tools Bodies（工具体）栏中选择要切出的实体工具。
- Intersect（交集）：将两个实体相交部分取出来，其余的实体被删除。
- Imprint Faces（表面印记）：生成一个实体（Tools Bodies）与另一个实体（Target Bodies）相交处的面；需要在 Target Bodies（目标体）和 Tools Bodies（工具体）栏中分别选择两个实体。

（13）Slice（切片）：增强了 DesignModeler 的可用性，可以产生用来划分映射网格的可扫掠分网的体。当模型完全由冻结体组成时，此命令才可用。选择此命令会弹出图 2−79 所示的切片设置面板。

在 Slice Type（切片类型）选项中有以下几种方式对体进行切片操作。

- Slice by Plane（用平面切片）：利用已有的平面对实体进行切片操作，平面必须经过实体，在 Base Plane（基准平面）栏中选择平面。
- Slice off Faces（用表面偏移平面切片）：在模型上选中一些面，这些面大概形成一定的凹面，本命令将切开这些面。
- Slice by Surface（用曲面切片）：利用已有的曲面对实体进行切片操作，在 Target Face（目标面）栏中选择曲面。
- Slice off Edges（用边做切片）：选择切分边，用切分出的边创建分离体。
- Slice By Edge Loop（用封闭棱边切片）：在实体模型上选择一条封闭的棱边来创建切片。

（14）Delete（删除）：包含删除体、删除面和删除线三个子选项。此命令用于“撤销”倒角和去材料等操作，可以将倒角、去材料等特征从体上移除。选择此命令会弹出图 2−80 所示的删除面设置面板。

在 Healing Method（处理方式）栏中有以下几种方式来实现删除面的操作。

- Automatic（自动）：选择此命令后，在 Face 栏中选择要去除的面，即可将面删除。
- Natural Healing（自然处理）：对几何体进行自然复原处理。
- Patch Healing（修补处理）：对几何实体进行修补处理。
- No Healing（不处理）：不进行任何修复处理。

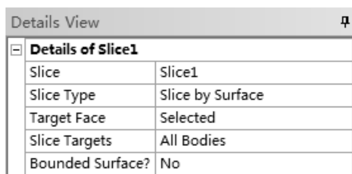


图 2-79　切片设置面板

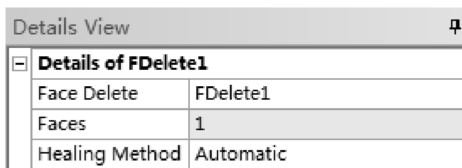


图 2-80　删除面设置面板

（15）Primitives（原始图形）：通过此可以创建一些简单的基本的图形，如球、箱体、圆柱及金字塔等。

- Sphere（球）：选择 Sphere 选项后，下面的 Details View 详细设置属性框中出现图 2-81 所示的详细设置窗口，在窗口中可设置球心三个方向的坐标值、球的半径，如果是空心球还可设置球的厚度等。
- Box（箱体）：选择 Box 选项后，下面的 Details View 详细设置属性框中出现图 2-82 所示的详细设置窗口，在窗口中可设置箱体第一点坐标值、对角线在三个方向的坐标值（或者第二点坐标值）及是否创建为薄壁零件等参数。

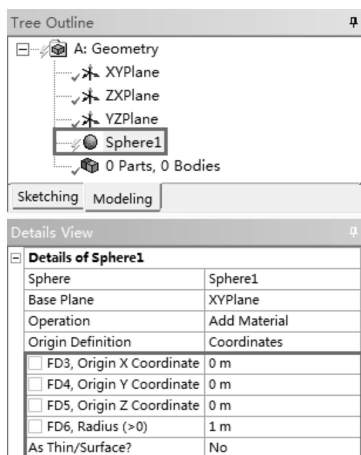


图 2-81　球参数

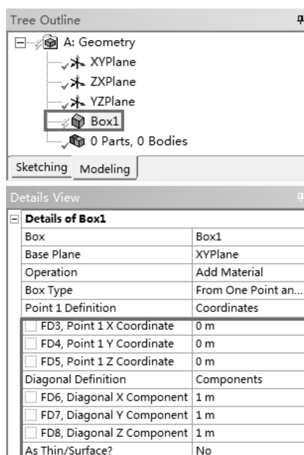


图 2-82　箱体参数

- Parallelepiped（平行六面体）：如图 2-83 所示，通过输入原始坐标和三个方向的坐标建立平行六面体。
- Cylinder（圆柱体）：如图 2-84 所示，通过输入原始坐标、轴向坐标及半径来建立平行六面体。

3. Concept（概念）菜单

图 2-85 所示为 Concept（概念）菜单，Concept 菜单中包含对线体和面操作的一系列命令，包括线体的生成与面的生成等。

4. Tools（工具）菜单

图 2-86 所示为 Tools（工具）菜单，Tools 菜单中包含对线、体和面操作的一系列命令，包括冻结、解冻、选择命名、属性、包含、填充等命令。

下面对一些常用的工具命令进行简单介绍。

（1）Freeze（冻结）：DM 平台会默认地将新建的几何体和已有的几何体合并起来保持为单

个体，如果想将新建立的几何体与已有的几何体分开，需要将已有的几何体进行冻结处理。

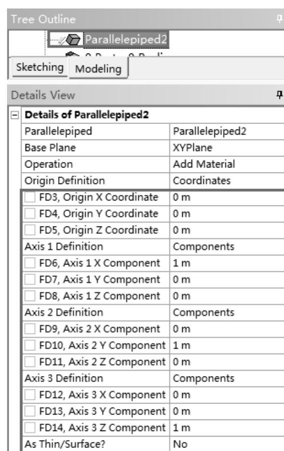


图 2-83　平行六面体参数

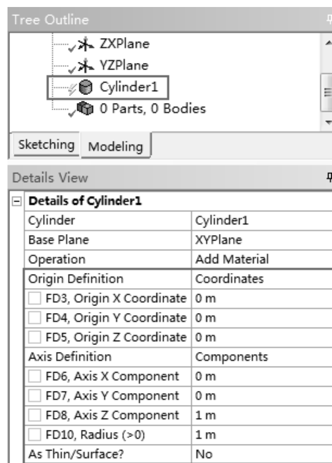


图 2-84　圆柱体参数

冻结特征可以将所有的激活体转到冻结状态，但是在建模过程中除切片操作以外，其他命令都不能用于冻结体。

（2）Unfreeze（解冻）：冻结的几何体可以通过本命令解冻。

（3）Named Selection（选择命名）：用于对几何体中的节点、边线、面、体等进行命名。

（4）Mid-Surface（中间面）：用于将等厚度的薄壁类结构简化成“壳”模型。

（5）Enclosure（包含）：在体附近创建周围区域以方便模拟场区域，此命令主要应用于流体动力学（CFD）及电磁场有限元分析（EMAG）等计算的前处理，通过 Enclosure 操作可以创建物体的外部流场或者绕组的电场或磁场计算域模型。

（6）Fill（填充）：与 Enclosure（包含）命令相似，Fill 命令主要为几何体创建内部计算域，如管道中的流场等。

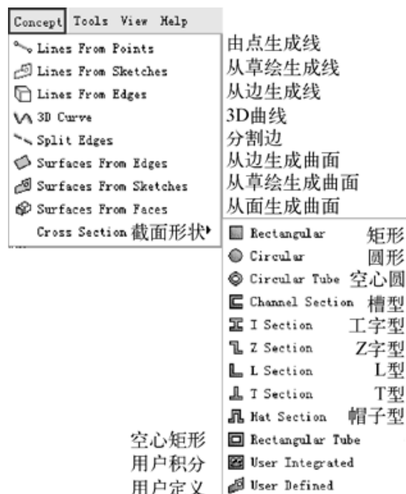


图 2-85　Concept 菜单

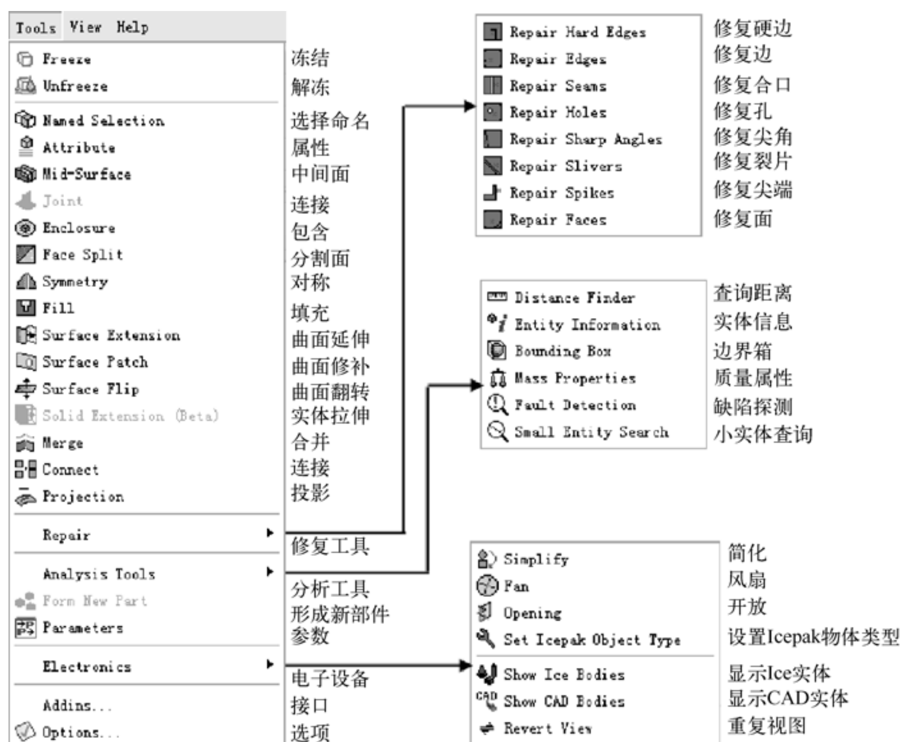


图 2−86　Tools 菜单

5. Units（单位）菜单

图 2−87 所示为 Units（单位）菜单，长度单位设置菜单中包括单位的选择，如国际单位制中的米、厘米、毫米、微米及英制单位的英尺、英寸六种。

还可以设置是否支持超大模型，默认为不支持；角度的单位可以设置成角度或者弧度两种；模型的残差等级的设置。

6. View（视图）菜单

图 2−88 所示为 View（视图）菜单，视图菜单各个命令主要对几何体显示的操作这里不再赘述。

7. Help（帮助）菜单

图 2−89 所示为 Help（帮助）菜单，帮助菜单提供了在线帮助等功能。

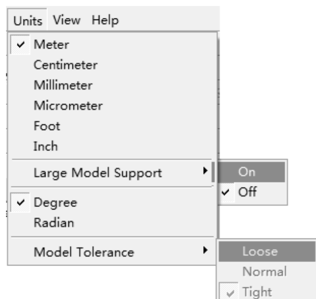


图 2−87　Unit 菜单

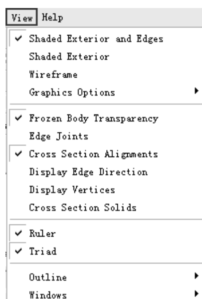


图 2−88　View 菜单

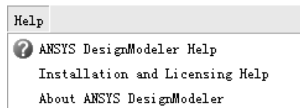


图 2−89　Help 菜单

2.2.3 工具栏

图 2-90 所示为 DesignModeler 平台默认的常用工具命令，这些命令在菜单栏中均可找到，下面对建模过程中经常用到的命令进行介绍。



图 2-90　工具栏

重点强调一下（相邻选择）命令，选择此命令后，出现以下四个下拉选项：

- Extend to Adjacent：近相邻选择命令；
- Extend to Limits：远相邻选择命令；
- Flood Blends：批量圆角选择命令；
- Flood Area：批量面选择命令。

以三键鼠标为例，鼠标左键实现基本控制，包括几何的选择和拖动，此外与键盘部分按钮结合使用实现不同操作。

- 〈Ctrl〉+鼠标左键：执行添加/移除选定几何实体；
- 〈Shift〉+鼠标中键：执行放大/缩小几何实体操作；
- 〈Ctrl〉+鼠标中键：执行几何体平移操作；

另外，按住鼠标右键框选几何实体，可以实现几何实体的快速缩放操作，在绘图区域单击鼠标右键可以弹出快捷菜单，以完成相关的操作，如图 2-91 所示。

1. 选择过滤器

在建模过程中，经常需要选择实体的某个面、某个边或者某个点等，可以在工具栏中相应的过滤器中进行选择切换，如图 2-92 所示，如果想选择图形中的某个面，首先单击工具栏中的按钮使其处于凹陷状态，然后选择所关心的面即可。如果想要选择线或者点，则只需选中工具栏中的或者按钮，然后点选所关心的线或者点即可。

如果需要对多个面进行选择，如图 2-93 所示，则需要单击工具栏中按钮，在弹出的菜单中选择 Box Select 命令，然后单击按钮，在绘图区域中框选所关心的面即可。

线或者点的框选与面类似，这里不再赘述。

框选的时候有方向性，具体说明如下。

- 鼠标从左到右拖曳：选中所有完全包含在选择中的对象；
- 鼠标从右到左拖曳：选中包含于或经过选择框的对象

利用鼠标还能直接对几何模型进行控制。

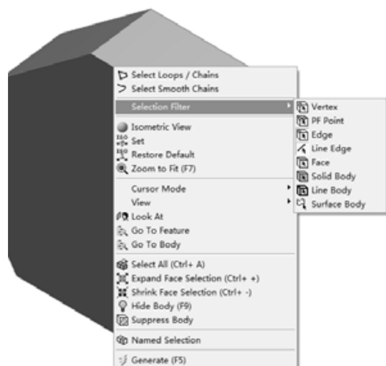


图 2−91　快捷菜单

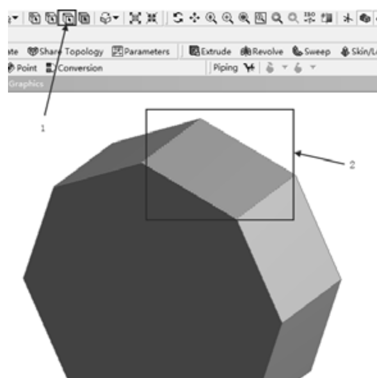


图 2−92　面选择过滤器

2. 窗口控制

DesignModeler 平台的工具栏上有各种控制窗口的快捷按钮，通过单击不同按钮，可实现图形控制，如图 2−94 所示。

- 按钮用来实现几何旋转操作；
- 按钮用来实现几何平移操作；
- 按钮用来实现图形的放大缩小操作；
- 按钮用来实现窗口的缩放操作；
- 按钮用来实现自动匹配窗口大小操作；
- 放大镜用来放大几何局部特征；
- 用来切换到上一视图操作；
- 用来切换到下一视图操作；
- 用来切换到等轴侧视图操作；
- 用来显示平面；
- 用来显示模型；
- 用来正视观察。

利用鼠标还能直接在绘图区域控制图形，如图 2−94 所示。当鼠标位于图形的中心区域时，相当于操作，当鼠标位于图形之外时为绕 Z 轴旋转操作，当鼠标位于图形界面的上下边界附近时为绕 X 轴旋转操作，当鼠标位于图形界面的左右边界附近时为绕 Y 轴旋转操作。

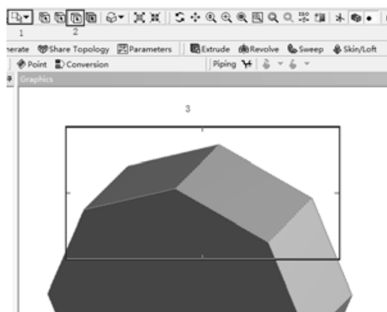


图 2−93　需要选择多个面的情况



图 2−94　窗口控制

2.2.4 常用命令栏

图 2−95 所示为 DesignModeler 平台默认的常用命令，这些命令在菜单栏中均可找到，这里不再赘述。

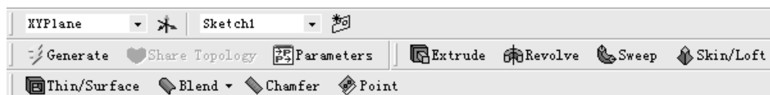


图 2−95 常用命令栏

2.2.5 Tree Outline（模型树）

图 2−96 所示的模型树中包括两个模块：Modeling（实体模型）和 Sketching（草绘），下面对 Sketching（草绘）模块中的命令进行详细介绍。



图 2−96 Tree Outline

Sketching（草绘）模块主要由以下几个部分组成：

（1）Draw（草绘）：图 2−97 所示为 Draw（草绘）下拉菜单，菜单中包括了二维草绘需要的所有工具，如直线、圆、矩形、椭圆等，操作方法与其他 CAD 软件一样。

（2）Modify（修改）：图 2−98 所示为 Modify（修改）下拉菜单，菜单中包括了二维草绘修改需要的所有工具，如圆角、倒角、裁剪、延伸、分割等，操作方法与其他 CAD 软件一样。

（3）Dimensions（尺寸标注）：图 2−99 所示为 Dimensions（尺寸标注）下拉菜单，菜单中包括了二维图形尺寸标注需要的所有工具，如一般、水平标注、垂直标注、长度/距离标注、半径直径标注、角度标注等，操作方法与其他 CAD 软件一样。

（4）Constraints（约束）：图 2−100 所示为 Constraints（约束）下拉菜单，菜单中包括了二维图形约束需要的所有工具，如固定、水平约束、竖直约束、垂直约束、相切约束、对称约束、平行约束、同心约束、等半径约束、等长度约束等，操作方法与其他 CAD 软件一样。



图 2-97　Draw 下拉菜单



图 2-98　Modify 下拉菜单

（5）Settings（设置）：图 2-101 所示为 Settings（设置）下拉菜单，主要用于完成草绘界面的栅格大小及移动捕捉步大小的设置任务。



图 2-99　Dimensions 下拉菜单



图 2-100　Constraints 下拉菜单

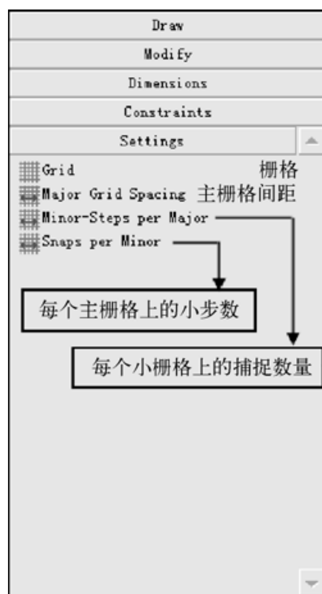


图 2-101　Settings 下拉菜单

1）在 Settings（设置）菜单下选择 Grid 命令，使 Grid 图标处于凹陷状态同时在后面生成 Show in 2D 和 Snap 复选框，勾选这两个复选框，此时用户交互窗口出现图 2-102 所示的栅格。

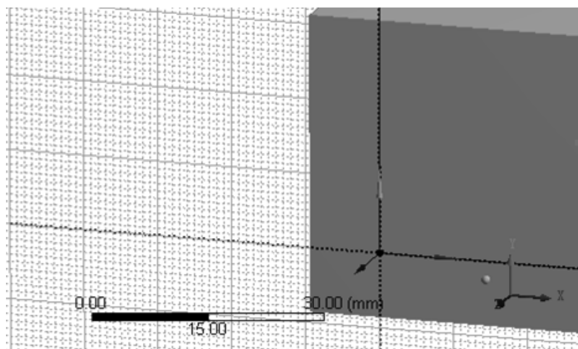


图 2−102　Grid 栅格

2）在 Settings（设置）菜单下选择 Major Grid Spacing 命令，使 Major Grid Spacing 图标处于凹陷状态同时在后面生成 10 mm ，在此文本框中输入主栅格的大小，默认为 10，将此值改成 20 后，在用户交互窗口出现图 2−103 右侧所示的栅格。

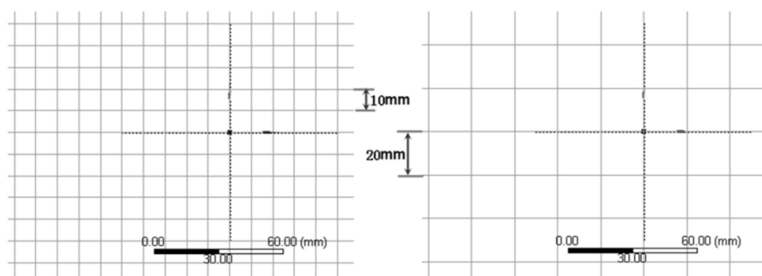


图 2−103　主栅格大小

3）在 Settings（设置）菜单下选择 Minor−Steps per Major 命令，使 Minor−Steps per Major 图标处于凹陷状态同时在后面生成 10 ，在此文本框中输入每个主栅格上划分的网格数，默认为 10，将此值改成 15 后，在用户交互窗口出现图 2−104 右侧所示的栅格。

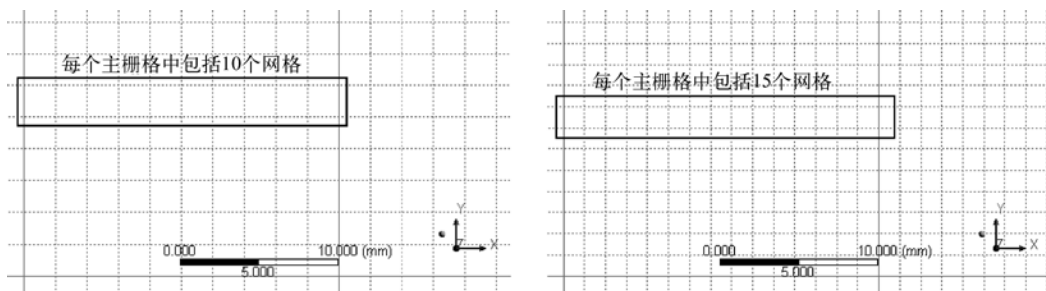


图 2−104　主栅格中小网格数量设置

4）在 Settings（设置）菜单下选择 Snaps per Minor 命令，使 Snaps per Minor 图标处于凹陷状态同时在后面生成 1 ，在此文本框中输入每个小网格上捕捉的次数，默认为 1，将此值改成 2 后，选择草绘直线命令，在用户交互窗口中单击直线第一点，然后移动鼠标，此时吸盘会在每个小网格四条边的中间位置被吸一次，如果值是默认的 1，则在四个角

点被吸住。

前面几节简单介绍了 DesignModeler 平台界面，本节开始将利用上述工具对稍复杂的几何模型进行建模。

2.2.6 DesignModeler 几何建模实例——连接板

本实例将创建一个图 2-105 所示的连接板模型，在模型的建立过程中使用了拉伸、去材料创建平面、投影及冻结实体等命令。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter02\char02-1\post.wbpj

Step1：启动 Workbench 17.0 软件后，在左侧的 Toolbox→Component Systems 选项卡中双击 Geometry 选项，新创建一个项目 A。然后在项目 A 的 A2：Geometry 中单击右键，选择 New DesignModeler Geometry 命令，如图 2-106 所示。

Step2：启动 DesignModeler 平台，选择 Units 菜单下面的 Millimeter，确定绘图单位制为 mm。

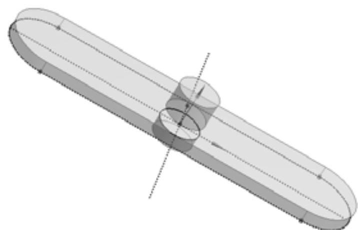


图 2-105　模型

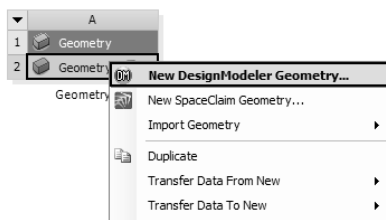


图 2-106　启动 DM

Step3：单击 Tree Outline 中 A:Geometry 下的 XYPlane 选项，如图 2-107 所示，然后单击图标，这时 XYPlane 草绘平面将自动旋转到正对着平面。

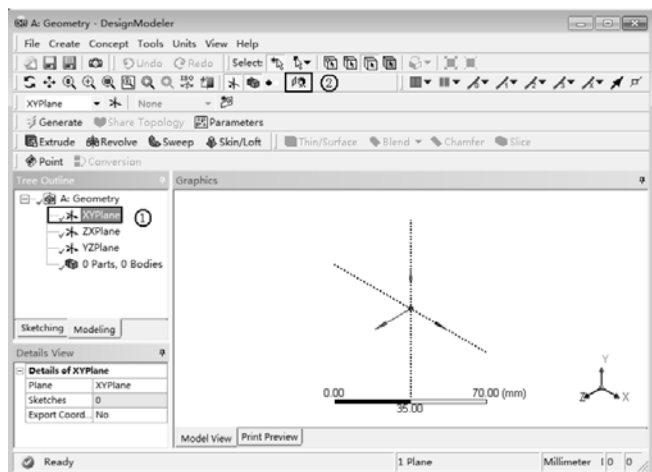


图 2-107　草绘平面

Step4：通过选择左侧 Tree Outline 窗口中的 Sketching 选项卡，切换到 Sketching 草绘模式，选择 Draw→Oval 命令，在绘图区域绘制图 2-108 所示的两端圆角的椭圆，椭圆的中心在坐标原点上。

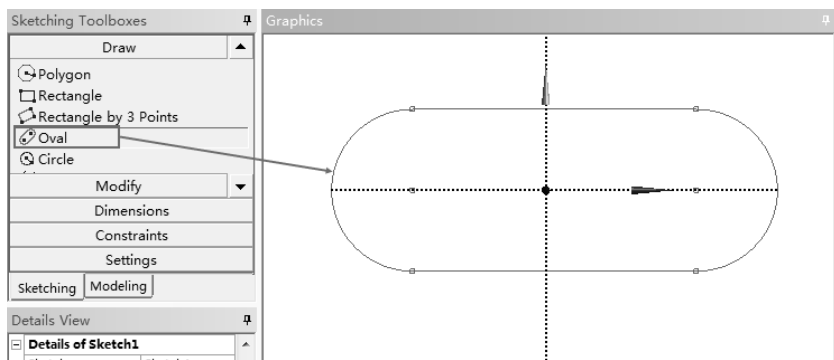


图 2-108　草绘

Step5：选择 Dimensions→General 命令，然后单击图 2-109 所示标注，标注其长度，在 Details View 面板中的 Dimensions：3 中的 H2 栏中输入 50mm，R1 栏中输入 15mm，H3 栏中输入 100mm，并按〈Enter〉键确定。

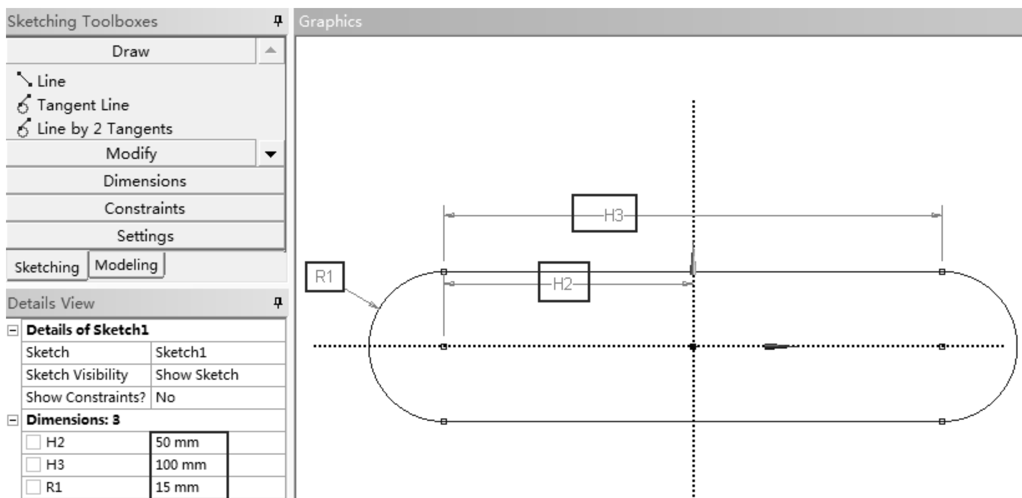


图 2-109　标注长度

注：General 工具除了能对长度进行标注外，还可以对距离、半径等尺寸进行智能标注，另外也可以使用 Horizontal 对水平方向尺寸进行标注，使用 Vertical 对竖直方向尺寸进行标注，使用 Radius 对圆形进行半径标注。

Step6：切换到 Modeling 模式，在工具栏中选择 Extrude 命令，如图 2-110 所示，在下面出现的 Details View 面板中，确保 Geometry 栏中的 Sketch1 被选中；在 FD1,Depth(>0)栏中输入 10mm，并单击 Generate 确定拉伸。

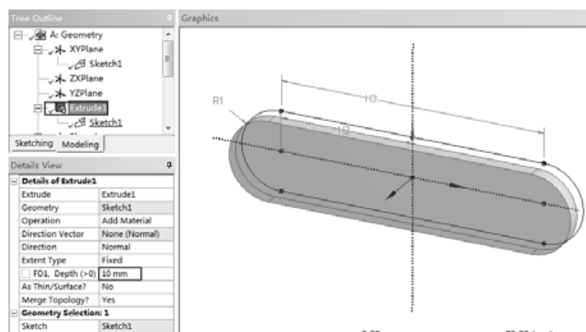


图 2-110　拉伸

Step7：单击工具栏中的按钮关闭草绘平面的显示，效果如图 2-111 所示。

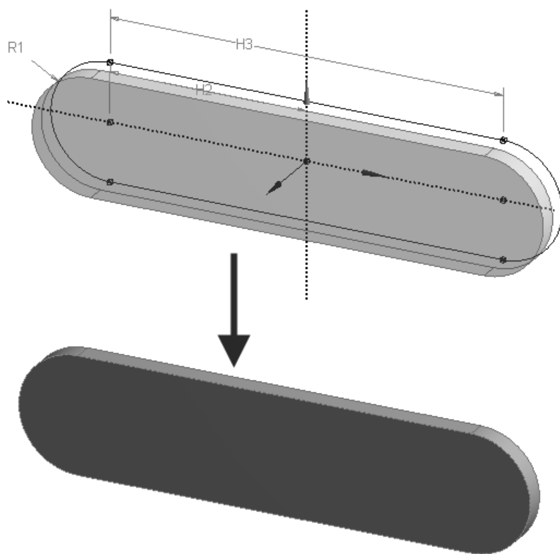


图 2-111　模型平面显示切换

Step8：创建圆柱。在工具栏中单击按钮，切换到面选择器，单击图 2-112 所示的平面，使其处于加亮显示状态。然后单击工具栏中的按钮，使加亮平面正对屏幕。

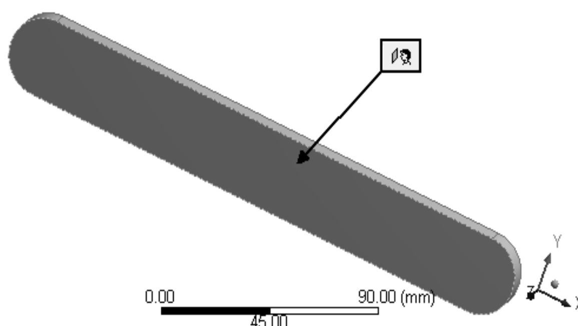


图 2-112　确定草绘平面

Step9：切换到 Sketching 草绘模式，选择 Draw→Circle 命令，在绘图区域绘制图 2-113 所示的圆，然后对圆进行标注，在 Details View 面板的 D5 栏中输入 15mm，在 H6 栏中输入 50mm，在 L7 栏中输入 15mm，并按〈Enter〉键确认输入。

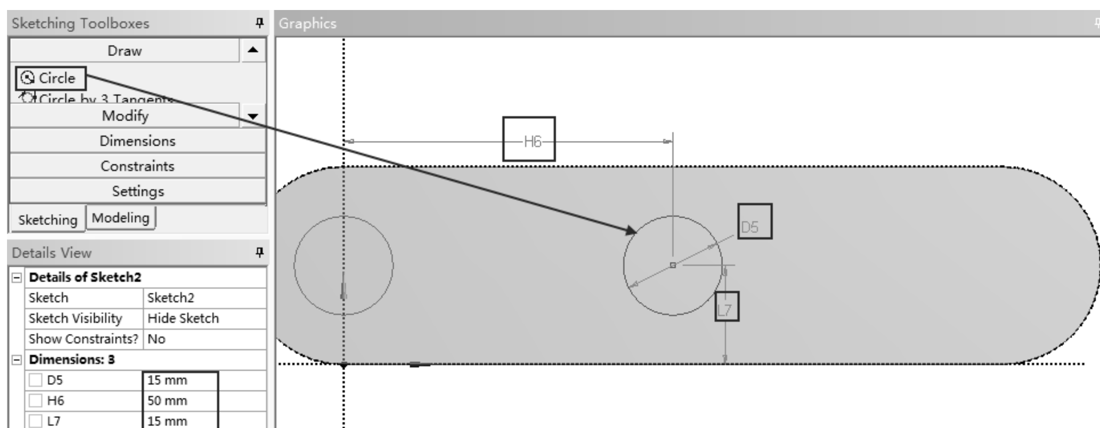


图 2-113 创建圆

Step10：选择工具栏中的 Extrude 命令，如图 2-114 所示，在 Details View 面板的 Geometry 栏中确保 Sketch2 被选中；在 Operation 栏中选择 Add Material 选项；在 Extent Type 栏中选择 Fixed 选项；在 FD1，Depth（>0）栏中输入 10mm。选择图示的加亮面，此时 Target Faces 栏中会显示数字 1，表面已有一个面被选中，其余选项默认即可，单击工具栏中的 Generate 按钮，完成拉伸的创建。

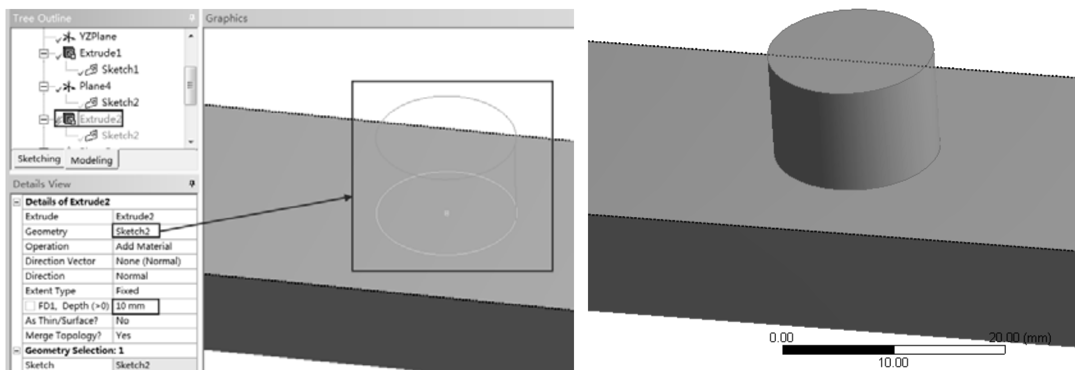


图 2-114 创建拉伸

Step11：创建对称平面。单击工具栏中的 按钮，在图 2-115 所示的 Details View 面板的 Type 栏中选择 From Centroid 选项；在 Base Entities 栏中确保实体被选中；其余选项保持默认即可，单击工具栏中的 Generate 按钮生成平面。

Step12：实体投影。单击鼠标右键选择 Plane5，在图 2-116 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Sketch Projection 选项。

Step13：在弹出的图 2-117 所示的 Details View 面板中作如下设置：

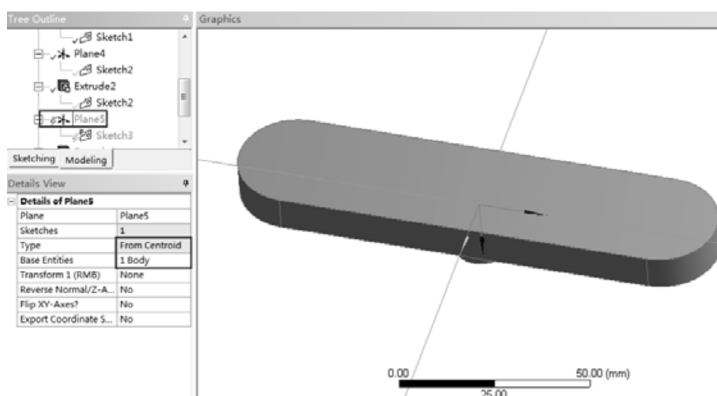


图 2-115　创建平面

在 Geometry 栏中确保一侧的半圆柱面被选中，单击 Generate 按钮，此时在 Plane5 平面上创建了一个投影草绘，如图 2-118 所示。

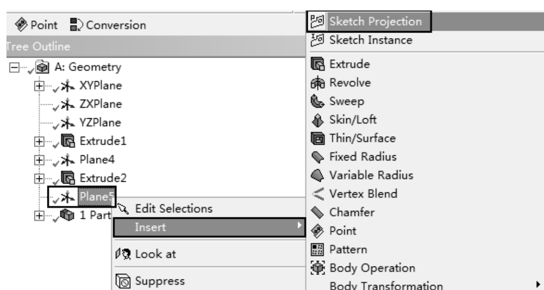


图 2-116　快捷菜单

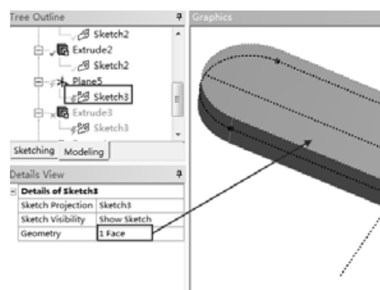


图 2-117　选择

Step14：切割实体。选择工具栏中的 Extrude 命令，在图 2-119 所示的 Details View 面板中做如下设置：在 Geometry 栏中确保 Sketch3 被选中；在 Operation 栏中选择 Cut Material 选项；在 Direction 栏选择 Reversed 选项；在 Extent Type 栏中选择 Through All 选项；其余选项默认即可，然后单击工具栏中的 Generate 按钮，生成去材料命令。

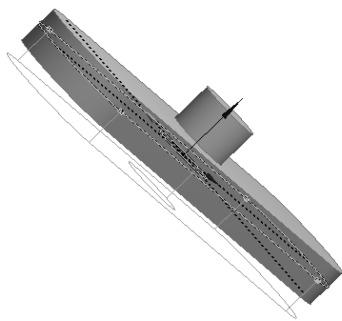


图 2-118　投影草绘

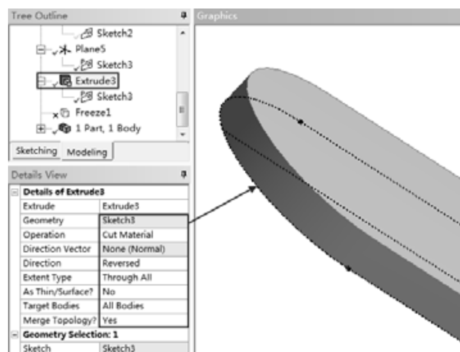


图 2-119　去材料

Step15：冻结实体。选择 Tree Outline 中的“1Part，1Body”下面的 Solid，然后选择菜单 Tools→Freeze 子菜单，如图 2-120 所示。此时几何实体变成透明状，如图 2-121 所示。

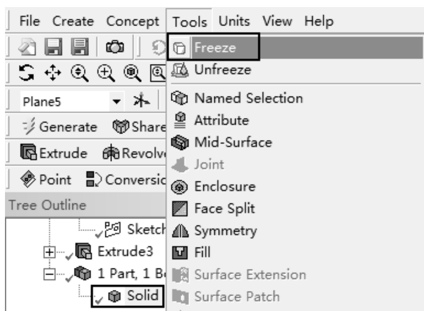


图 2-120 冻结设置

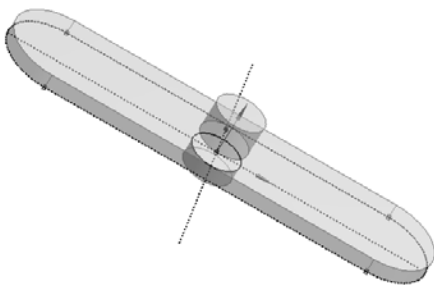


图 2-121 冻结

Step16： 单击工具栏中的按钮，在弹出的“保存”对话框中输入 post。关闭 DesignModeler 程序。单击右上角的按钮关闭程序。

DesignModeler 除了能对几何体进行建模外，还能对多个几何进行装配操作，由于篇幅限制，本实例简单介绍了 DesignModeler 平台几何建模的基本方法，并未对复杂几何进行讲解，请读者根据以上操作及 ANSYS 帮助文档进行学习。

2.2.7 ANSYS SpaceClaim 同步几何建模实例——连接板

利用 SpaceClaim，用户可以比以往任何时候更快地进行模型的创建和编辑。不同于基于特征的参数化 CAD 系统，SpaceClaim 能够让用户以最直观的方式对模型直接编辑，自然流畅地进行模型操作而无须关注模型的建立过程。

SpaceClaim 作为 3D 建模解决方案，目前其第四代产品已推出，即 SpaceClaim Engineer 和 SpaceClaim Style。这些直接建模工具象征了这十多年来 3D 工程领域最显著的技术进步，从简单发展到能够专供工程师和工业设计师自由灵活操作，快速捕捉灵感，可以随意编辑实体模型而不用考虑坐标原点，并为分析、原型、制造做设计准备。

SpaceClaim 使得设计和工程团队能更好地协同工作，能降低项目成本并加速产品上市周期。SpaceClaim 让用户按自己的意图修改已有设计，不用在意它的创建过程，也无须深入了解它的设计意图，更不会困扰于复杂的参数和限制条件。

SpaceClaim 虽然仅有四大主要建模工具，但却能完成用户想要做的设计和编辑：直接建模工具（拖拉和移动）能轻松自如地完成设计和编辑；合并工具能轻易地完成各种模型的合并和分割；填充工具能快速地填充或去除各种特征，而不用担心实现的过程，SpaceClaim 可以帮助用户实现构想。

SpaceClaim 支持标准数据交换格式，如 ACIS、STEP、IGES、ECAD、Rhinoceros、DWG、DXF、STL、OBJ、XAML、VRML、3D PDF，包括与 Bunkspeed&reg、HyperShot 的交互。安装附加模块后，SpaceClaim Engineer 还可以直接导入并编辑 Creo、Autodesk、Inventor、CATIA V4 和 V5、VDA、Parasolid、SolidWorks、JT™以及 NX 的文件。

CAD 模型在用于模具设计、CAE 网格划分、数控加工等操作之前，都需要进行模型的清理工作，去除不需要的孔、小的圆角、倒角、凸台等，通常这些工作会需要很多的时间，SpaceClaim 软件的几何模型清理方法则可以快速完成这些清理工作。

SpaceClaim 的模型修改与清理工具里的填充工具极其适合去除凸台、凹陷、圆角等部位，它会智能判断所选取面所属的部位特性，然后施加不同的操作，对于凸台，执行的是去除，而对于凹陷执行的是填充，一个命令就可以完成绝大多数的清理任务。

SpaceClaim 的建模工具可以在零件或装配的任意截面视图、二维工程图以及任意 3D 视图下工作，甚至可以在 SpaceClaim 的 3D 标注环境下工作。用户在熟悉的 2D 设计视图下通过一个布局或对 2D 元素进行回转、对称等操作即可轻松得到三维部件。

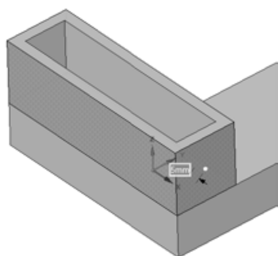
用户能够用任意相交平面剖分模型进行设计优化。替换零件的表面为另一曲面而无须对零件的其他部分进行重构，SpaceClaim 鼓励真正创新的设计。

对于直接建模技术，不管模型是否有特征（比如从其他 CAD 系统读入的非参数化模型），用户都可以直接进行后续模型的创建，不管是修改还是增加几何都无须关注模型的建立过程。这样就使得用户可以在一个自由的 3D 设计环境下工作，以比以往任何时候更快的速度进行模型的创建和编辑。不同于基于特征的参数化 3D 设计系统，直接建模能够让用户以最直观的方式对模型直接进行编辑，所见即所得，自然流畅地进行模型操作。

本实例将创建一个图 2−122 所示几何模型，在模型的建立过程使用了自下而上的建模方式，即由点到线、由线到面、由面到体的建模思路，此外还使用了抽壳命令。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter02\char02−2\pedestor.wbpj

Step1：启动 Workbench 17.0 软件后，在左侧的 Toolbox→Component Systems 选项卡中双击 Geometry 选项，新创建一个项目 A。然后在项目 A 的 A2：Geometry 中单击右键，选择 New SpaceClaim Geometry 命令，如图 2−123 所示。


图 2−122　几何

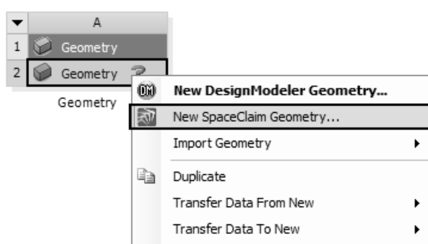


图 2−123　右键捷菜单

Step2：启动 ANSYS SpaceClaim 平台，打开图 2−124 所示的几何创建平台，由于 ANSYS SpaceClaim 默认的单位为 mm，所以这里不需要对单位进行设置。

从图 2−124 可以看出，ANSYS SpaceClaim 平台界面由以下几部分组成。

（1）工具栏：最上端的一行，其中有打开文件、保存几何、向前重做及向后操作四个默认按钮，读者可通过单击右侧的 ▾ 下拉按钮可以对工具栏中的工具进行添加和删除操作。

（2）菜单选项卡：ANSYS SpaceClaim 平台的菜单选项卡中有以下一些菜单选项。

① 文件（F）：单击“文件”选项卡，此时将弹出图 2−125 所示的菜单，在菜单中有

“新建”“打开”“保存”“另存为”“共享”“Save Project”“打印”“关闭”“SpaceClaim 选项”及“退出 SpaceClaim”等操作命令，单击“新建”按钮后，在右侧将出现新建的类型，包括设计、工程图纸、清空工程图纸、设计并绘制图纸及三维标记 5 种新建类型。

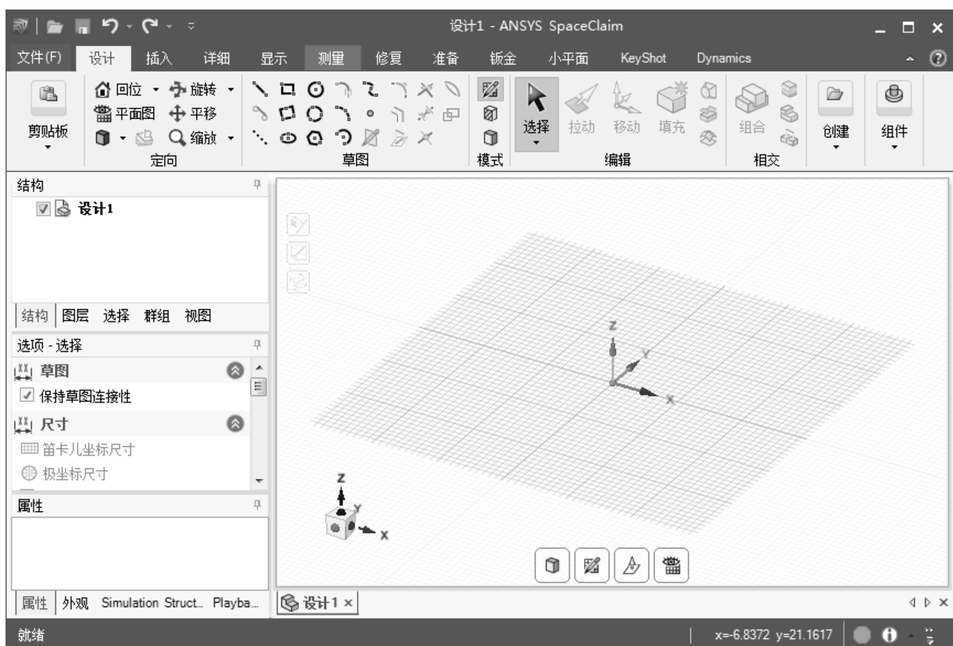


图 2-124 SpaceClaim 平台

单击“打开”按钮，将弹出图 2-126 所示的“打开”对话框，在文件类型中可以看出 ANSYS SpaceClaim 平台支持的几何文件类型非常多，这里不再一一介绍，请读者自己操作并理解。



图 2-125 “文件”菜单



图 2-126 “打开”对话框



SpaceClaim 选项中可以对 ANSYS SpaceClaim 平台中的网格尺寸、渲染程度及保存格式等进行设置。

② 设计：单击“设计”选项卡后，将出现图 2−127 所示的“设计”工具栏，在工具栏中有剪切板、定向、草图、模式、编辑、相交、创建及装配图 8 个子选项。

- 剪切板：通过选择几何然后单击“复制”和“粘贴”按钮可以完成几何的复制粘贴操作；其中的“格式刷”可以对一个几何体实现与另一个一样的几何体视觉效果。
- 定向：可以实现对几何体进行平移、旋转、回位及缩放等操作；其中“平面图”用于单击几何的一个平面后，再单击平面图，将几何旋转到选择平面与屏幕平行的位置，方便读者进行几何绘制。



图 2−127 “设计”工具栏

- 草图：这部分相当于 DM 建模平台中的 Skechering 操作，可以完成点、直线、矩形、圆形、圆弧、多边形、样条曲线及虚线的创建，此外还可以完成对线条的延伸、剪裁、投影、倒角、缩放等操作。
- 模式：包括草图模式、剖面模式及实体模式三种类型。
- 编辑：包括选择（包括使用方框、使用套索、使用多边形、使用画笔、使用边界、全选、取消选择及选择组件）、拉伸、移动、填充、融合、替换及调整面等与几何实体操作相关的命令；
- 相交：包括组合、拆分主体、拆分面、投影灯操作。
- 创建：包括创建平面、中心线、坐标系、偏移、壳体、镜像等操作。
- 装配体：其中包括相切、对齐、定向、刚性、齿轮、定位等操作。

③ 插入：单击“插入”选项卡，在选项卡中单击“文件”按钮，此时弹出图 2−126 所示的“打开”对话框，通过此命令可以导入几何文件。除此之外在该选项卡中还可以定向网格、抽取曲线、矢量化图像、打孔、创建工件、去除毛刺、展开等，如图 2−128 所示。



图 2−128 “插入”选项卡

④ 详细：单击“详细”选项卡，可以完成尺寸标注、字体设置、公差标注等操作，如图 2−129 所示。



图 2-129 “详细”选项卡

⑤ 显示：单击“显示”选项卡，可以进行涂层设置、线粗细设置、图形显示设置等操作，如图 2-130 所示。



图 2-130 “显示”选项卡

⑥ 测量：单击“测量”选项卡，可以进行几何长度测量、质量计算、检查几何体、曲线、体积、法线、栅格、曲率、拔模等操作，如图 2-131 所示。



图 2-131 “测量”选项卡

⑦ 修复：单击“修复”选项卡，可以进行几何缺陷的检查、修补、边线的拟合修复等工作，如图 2-132 所示。



图 2-132 “修复”选项卡

⑧ 准备：单击“准备”选项卡，如图 2-133 所示，可以完成体积抽取、中间面提取，设置外壳、压印、干涉检查、梁单元的轮廓（截面形状），还可以将几何模型通过 ANSYS Workbench 平台及 ANSYS AIM 平台打开等。



图 2-133 “准备”选项卡

⑨ 钣金：单击“钣金”选项卡，如图 2-134 所示，可对几乎所有结构的钣金件进行操作，包括接合、止裂槽、形状、拆分、弯曲、展开等。



图 2-134 “钣金”选项卡

⑩ 小平面：单击“小平面”选项卡，可以完成对网格的划分、检查、修复、分离、合并等操作，并可以将网格导出到*.stl 格式，以供其他软件使用。



图 2-135 “小平面”选项卡

⑪ KeyShot：单击 KeyShot 选项卡，如果未安装 KeyShot，将显示图 2-136 所示的选项，此时单击“下载 KeyShot”按钮，即可通过 KeyShot 官方网址下载适用于当前 SpaceClaim 版本的 KeyShot 程序；如果安装了 KeyShot，便可以对几何进行渲染操作。渲染操作不是本书的讲解范围，这里不再赘述。

注：KeyShot 软件是收费软件，需要单独的 license 支持。



图 2-136 “KeyShot”选项卡

⑫ Dynamics：单击 Dynamics 选项卡，如果 Dynamics 未安装，系统会提示下载（类似 KeyShot 选项卡），如果安装完毕，将显示图 2-137 所示的工具栏，其中包括完成一个机构的动态运动的各种命令，这里不再赘述。



图 2-137 “Dynamics”选项卡

Step3：选择工具栏中的“设计”选项卡，在其中单击平面图按钮，可将绘图平面切换到屏幕，如图 2-138 所示，此时的绘图平面为 XZ 平面。

Step4：选择工具栏中的“设计”选项卡，在其中的“草图”栏中选择图标，在坐标原点绘制一个边长分别为 100 和 50 的长方形，如图 2-139 所示。

Step5：选择工具栏中的“设计”选项卡，单击按钮，此时长方形变成了如图 2-140 所示的矩形图。

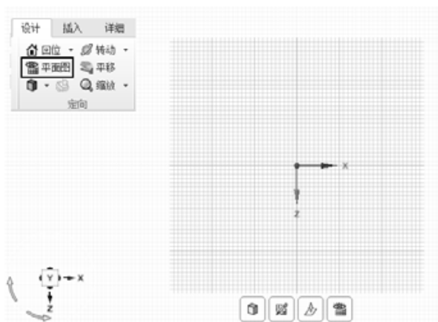


图 2-138　绘图平面

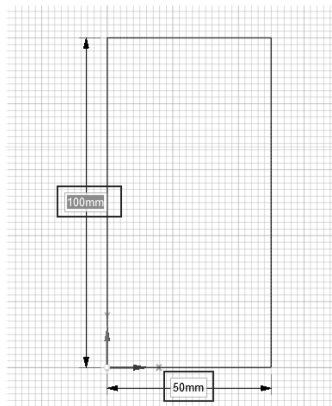


图 2-139　创建长方形

Step6：鼠标左键单击平面中的任何一个位置不放，然后往上推曳鼠标，此时平面将被拉伸成实体，如图 2-141 所示。



图 2-140　长方形

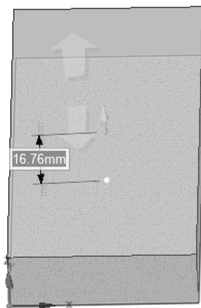


图 2-141　长方形实体

Step7：在自动弹出的输入框中输入拉伸厚度为 20，如图 2-142 所示，此时完成了长方体的创建。

Step8：选择工具栏中的"设计"选项卡，单击 按钮，在坐标原点绘制一个点，如图 2-143 所示。

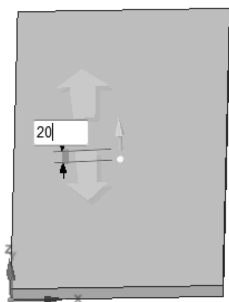


图 2-142　输入框

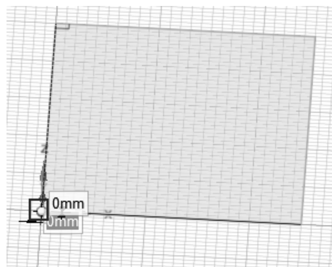


图 2-143　创建点

Step9：在“设计”选项卡中单击“拉伸”按钮，然后选择刚才创建的点不放，并拖曳鼠标，如图 2−144 所示，此时将从点创建一条直线，输入拉伸长度为 30。

Step10：单击刚创建的直线不放，拖曳鼠标，并在拉伸的长度中输入 50，如图 2−145 所示。

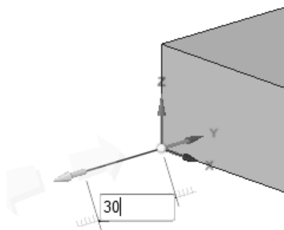


图 2−144　点拉伸成线

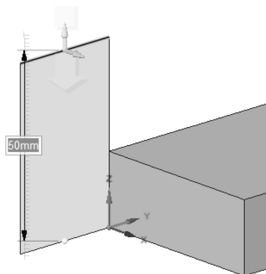


图 2−145　线拉伸成面

Step11：在“设计”选项卡中单击“拉伸”按钮，然后选择刚才创建的面不放，并选中左侧工具栏中的命令进行双面拉伸，拖曳鼠标并输入厚度为 100，如图 2−146 所示。

Step12：选择工具栏中的拆分主体命令，然后先选中几何实体，再选择图 2−147 所示的面进行几何分割，分割完成后由分割面将几何变成两个实体。

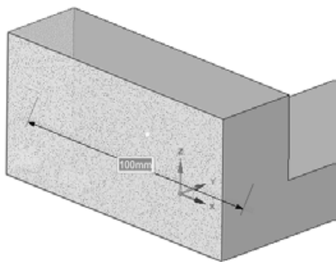


图 2−146　面拉伸成体

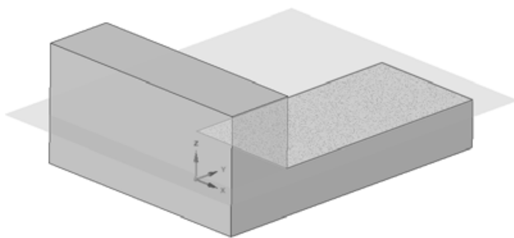


图 2−147　几何分割

Step13：在“设计”选项卡中单击壳体按钮，然后选中上面的长方体上表面，在弹出的“厚度”对话框中输入 5，如图 2−148 所示。

Step14：单击绘图窗口中的按钮，完成几何抽壳，如图 2−149 所示。

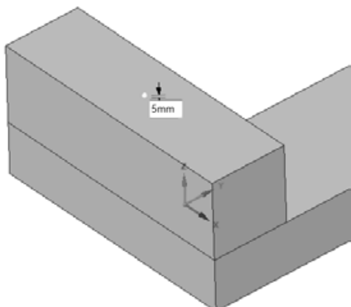


图 2−148　厚度设置

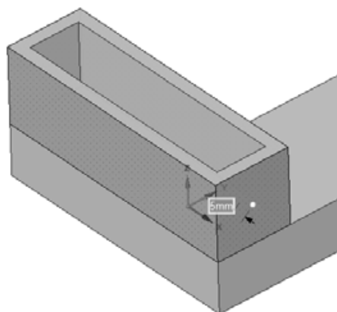


图 2−149　几何抽壳

Step15：单击工具栏中的按钮，在弹出的“保存”对话框中输入 pedestor。关闭 SpaceClaim 程序。单击右上角的按钮关闭程序。

2.3 本章小结



本章是有限元分析中的第一个关键过程——几何建模，本章介绍了 ANSYS Workbench 17.0 几何建模的方法及集成在 Workbench 平台上的 DesignModeler 几何建模工具的建模方法，并通过一个应用实例进行了讲解。

第 3 章　网 格 划 分

在有限元计算中只有网格的节点和单元参与计算，在求解开始，Meshing 平台会自动生成默认的网格，用户可以使用默认网格，并检查网格是否满足要求，如果自动生成的网格不能满足工程计算的需要，则需要人工划分网格，细化网格和不同的网格对结果影响比较大。

网格的结构和疏密程度直接影响到计算结果的精度，但是网格加密会增加 CPU 的计算时间且需要更大的存储空间。理想的情况下，用户需要的是结果不再随网格的加密而改变的网格密度，即当网格细化后，解没有明显改变；如果可以合理地调整收敛控制选项，同样可以达到满足要求的计算结果，但是，细化网格不能弥补不准确的假设和输入引起的错误，这一点需要读者注意。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
ANSYS Workbench 网格划分的原理		√		
ANSYS Workbench 网格质量检查方法			√	√
ANSYS Workbench 不同求解域网格划分			√	√
ANSYS Workbench 外部网格导入与导出			√	√

3.1　ANSYS Meshing 17.0 网格划分

3.1.1　Meshing 网格划分适用领域

Meshing 平台网格划分可以根据不同的物理场需求提供不同的网格划分方法，图 3-1 所示为 Mesh 平台的物理场参照类型（Physics Preference）。

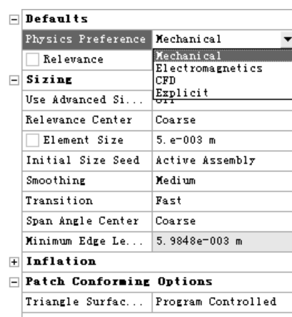


图 3-1　网格划分物理参照设置

（1）Mechanical：为结构及热力学有限元分析提供网格划分。

（2）Electromagnetics：为电磁场有限元分析提供网格划分。

（3）CFD：为计算流体动力学分析提供网格划分，如 CFX 及 Fluent 求解器。

（4）Explicit：为显式动力学分析软件提供网格划分，如 AUTODYN 及 LS-DYNA 求解器。

3.1.2 Meshing 网格划分方法

对于三维几何来说，ANSYS Mesh 有以下几种不同的网格划分方法。

（1）Automatic（自动网格划分）。

（2）Tetrahedrons（四面体网格划分）：当选择此选项时，网格划分方法又可进一步细分。

- Patch Conforming 法（Workbench 自带功能）：默认时考虑所有的面和边（尽管在收缩控制和虚拟拓扑时会改变且默认损伤外貌基于最小尺寸限制）；适度简化 CAD（如 native CAD、Parasolid、ACIS 等）；在多体部件中可能结合使用扫掠方法生成共形的混合四面体/棱柱和六面体网格；有高级尺寸功能；表面网格→体网格。
- Patch Independent 法（基于 ICEM CFD 软件）：对 CAD 有长边的面、许多面的修补和短边等有用；内置 defeaturing/simplification 基于网格技术；体网格→表面网格。

（3）Hex Dominant（六面体主导网格划分）：当选择此选项时，Mesh 将采用六面体单元划分网格，但是会包含少量的金字塔单元和四面体单元。

（4）Sweep（扫掠法）。

（5）MultiZone（多区法）。

（6）Inflation（膨胀法）。

对于二维几何体来说，ANSYS Mesh 有以下几种不同的网格划分方法。

（1）Quad Dominant（四边形主导网格划分）。

（2）Triangles（三角形网格划分）。

（3）Uniform Quad/Tri（四边形/三角形网格划分）。

（4）Uniform Quad（四边形网格划分）。

图 3-2 所示为采用 Automatic 网格划分方法得出的网格分布。

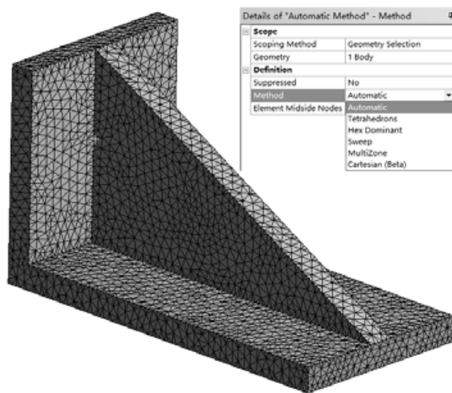


图 3-2　Automatic 网格划分方法

图 3-3 所示为采用 Tetrahedrons 及 Patch Conforming 网格划分方法得出的网格分布。

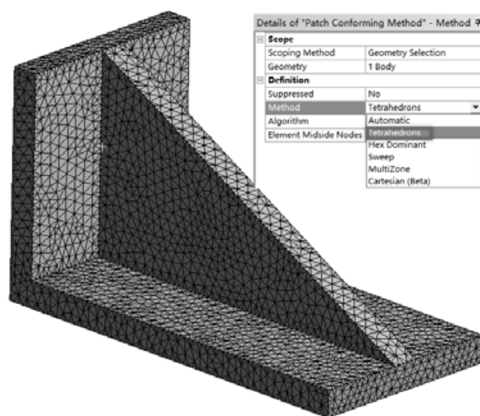


图 3-3　Tetrahedrons 及 Patch Conforming 网格划分方法

图 3-4 所示为采用 Patch Independent 网格划分方法得出的网格分布。

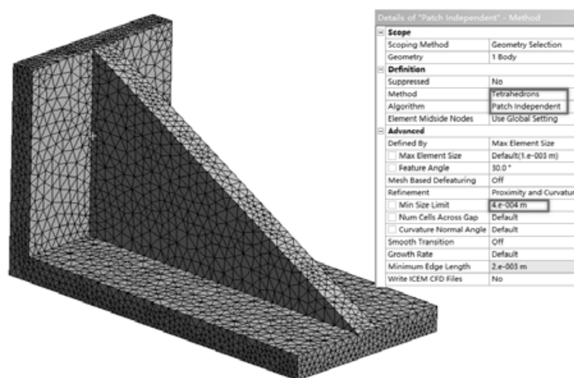


图 3-4　Patch Independent 网格划分方法

图 3-5 所示为采用 Hex Dominant 网格划分方法得出的网格分布。

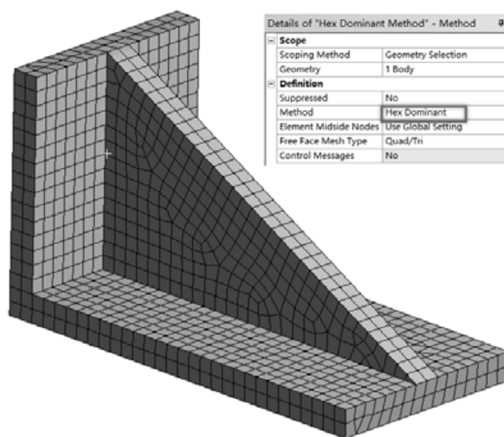


图 3-5　Hex Dominant 网格划分方法

图 3-6 所示为采用 Sweep 法划分的网格模型。

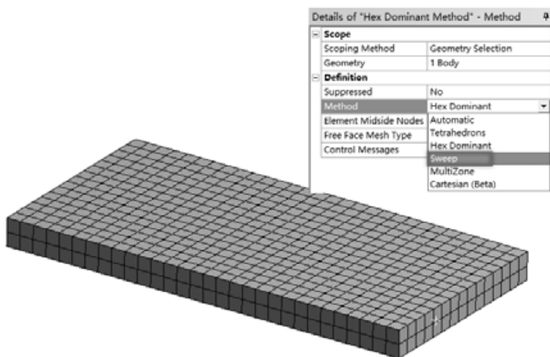


图 3-6　Sweep 网格划分方法

图 3-7 所示为采用 MultiZone 划分的网格模型。

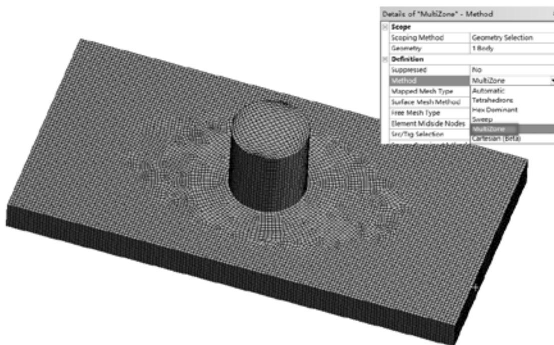


图 3-7　MultiZone 网格划分方法

图 3-8 所示为采用 Inflation 划分的网格模型。

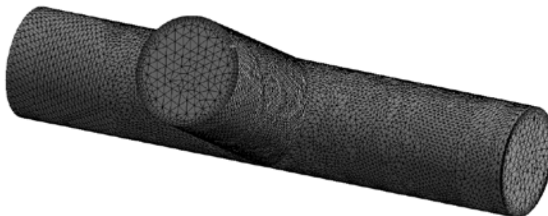


图 3-8　Inflation 网格划分方法

3.1.3 Meshing 网格默认设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板的 Defaults 中进行物理模型选择和相关性设置。

图 3-9～图 3-12 为 1×1×1 的立方体在默认网格设置情况下，结构计算（Mechanical）、电磁场计算（Electromagnetics）、流体动力学计算（CFD）及显式动力学分析（Explicit）四个不同物理模型的节点数和单元数。

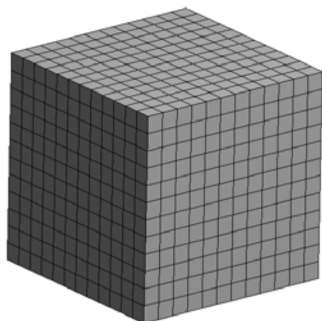


图 3-9　结构计算网格

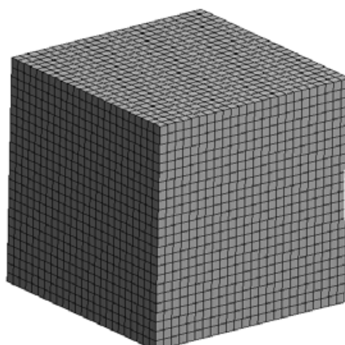


图 3-10　电磁计算网格

从中可以看出，在程序默认情况下，单元数量由小到大的顺序为：流体动力学分析=结构分析<显式动力学分析=电磁场分析；节点数量由小到大的顺序为：流体动力学分析<结构分析<显式动力学分析<电磁场分析。

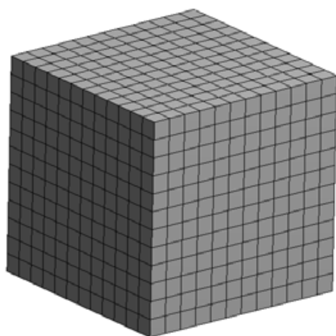


图 3-11　流体计算网格

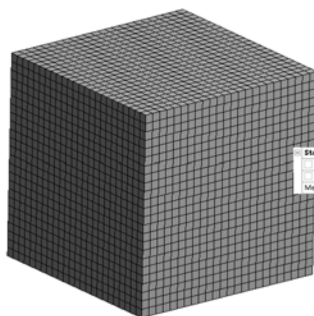


图 3-12　显式动力学计算网格

当物理模型确定后，可以通过 Relevance 选项来调整网格疏密程度，图 3-13～图 3-16 为在 Mechanical（结构计算物理模型）时，Relevance 分别为-100、0、50、100 所对应的单元数量和节点数量，对比这四张图可以发现 Relevance 值越大，则节点和单元划分的数量越多。

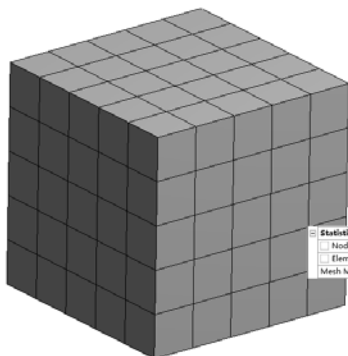


图 3-13　Relevance=-100

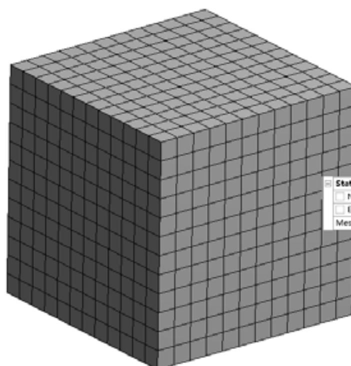


图 3-14　Relevance=0

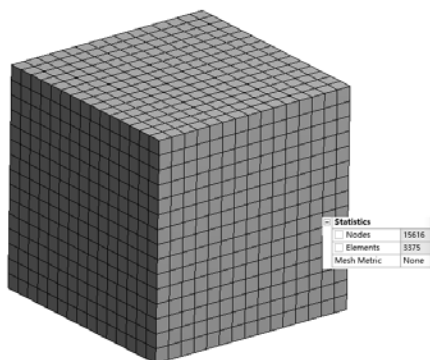


图 3-15　Relevance=50

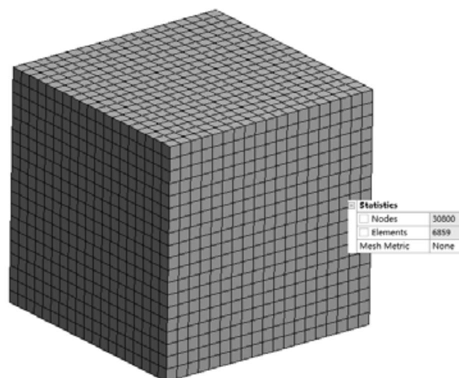


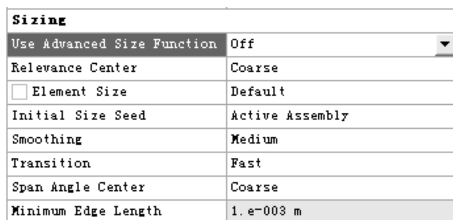
图 3-16　Relevance=100

3.1.4 Meshing 网格尺寸设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板的 Sizing（尺寸）中进行网格尺寸的相关设置。图 3-17 所示为 Sizing（尺寸）设置面板。

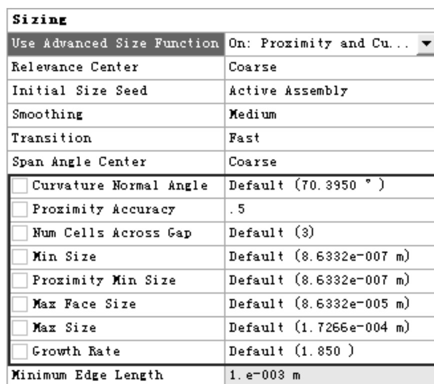
（1）Use Advanced Size Function（使用高级网格划分方式）：网格细化的方法，此选项默认为“关闭”（Off）状态，单击后面的下拉按钮，可以看到 Use Advanced Size Function 状态为 On 时的其他四个选项。

当选择 On：Proximity and Curvature（接近和曲率）选项时，面板会增加网格控制设置，如图 3-18 所示。



Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1. e-003 m

图 3-17　Sizing（尺寸）设置面板



Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Cu...
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (70. 3950 °)
Proximity Accuracy	. 5
Num Cells Across Gap	Default (3)
Min Size	Default (8. 6332e-007 m)
Proximity Min Size	Default (8. 6332e-007 m)
Max Face Size	Default (8. 6332e-005 m)
Max Size	Default (1. 7266e-004 m)
Growth Rate	Default (1. 850)
Minimum Edge Length	1. e-003 m

图 3-18　Using Advanced Size Function 设置

针对 Proximity and Curvature 选项的设置，Meshing 平台根据几何模型的尺寸，均有相应的默认值，读者亦可以结合工程需要对其下各个选项进行修改与设置，以满足工程仿真计算的要求。

当选择其他三个选项时，其设置与 Use Advanced Size Function 相似，这里不再赘述，请读者自己完成。

（2）Relevance Center（相关性中心）：此选项的默认值为 Coarse（粗糙），根据需要可

以分别设置为 Medium（中等）和细化（Fine）。图 3-19～图 3-21 为将 1×1×1 的立方体中 Relevance Center 分别设置为 Coarse、Medium、Fine 三种情况时的节点和单元数量。

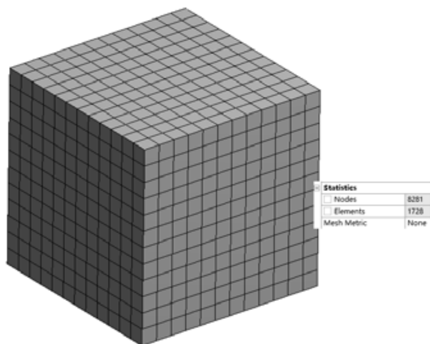


图 3-19　Relevance Center =Coarse 时的节点和单元数量

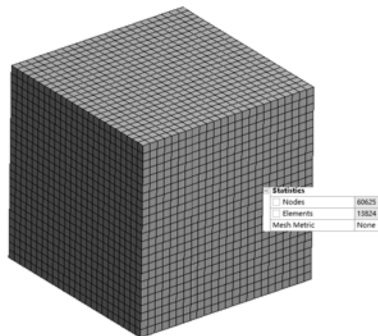


图 3-20　Relevance Center =Medium 时的节点和单元数量

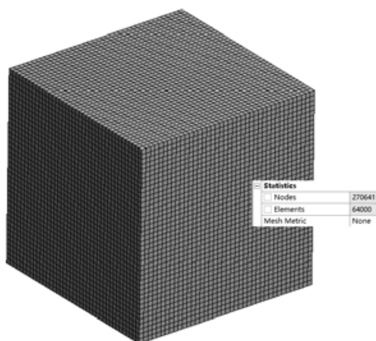


图 3-21　Relevance Center =Fine 时的节点和单元数量

从以上三种设置可以看出，当 Relevance Center 的选项由 Coarse 变为 Fine 后，几何模型的节点数量和单元数量也增加了，已达到细化网格的目的。

（3）Element Size（单元尺寸）：在此选项后面输入网格尺寸大小，可以控制几何尺寸网格划分的粗细程度。图 3-22～3-24 为 Element Size 设置为默认、Element Size=1.e-004m、Element Size=4.e-004m 三种情况下的节点数量及单元数量。

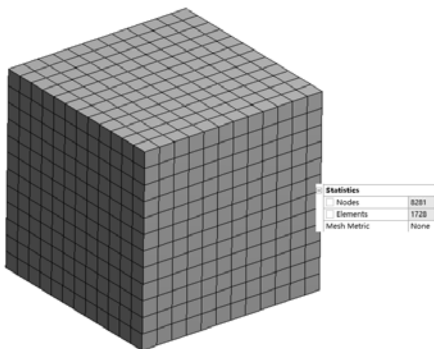


图 3-22　Element Size 设置为默认时的节点和单元数量

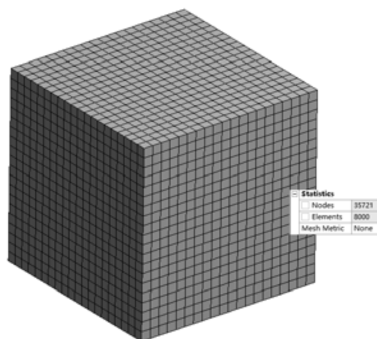


图 3-23　Element Size =1.e-004m 时的节点和单元数量

从图 3-22～图 3-24 可以看出，网格划分可以通过设置网格单元尺寸的大小来控制。

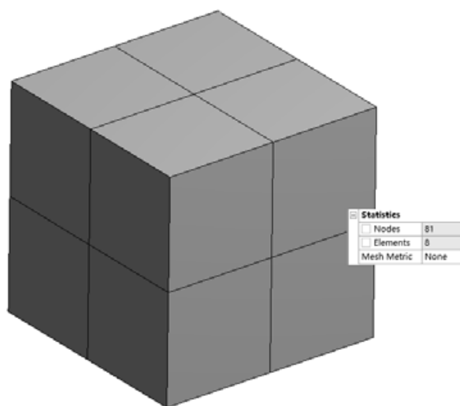


图 3-24 Element Size =5.e-004m 时的节点和单元数量

（4）Initial Size Seed（初始化尺寸种子）：此选项用来控制每一个部件的初始网格种子，如果单元尺寸已被定义，则会被忽略，在 Initial Size Seed 栏中有三种选项可供选择：Active Assembly（激活的装配体）、Full Assembly（全部装配体）及 Part（零件）。下面对这三种选项分别进行讲解。

- Active Assembly（激活的装配体）：基于这个设置，初始种子放入未抑制部件，网格可以改变。
- Full Assembly（全部装配体）：基于这个设置，初始种子放入所有装配部件，不管抑制部件的数量有多少，抑制部件网格不改变。
- Part（零件）：基于这个设置，初始种子在网格划分时放入个别特殊部件，抑制部件网格不改变。

（5）Smoothing（平滑度）：平滑网格是通过移动周围节点和单元的节点位置来改进网格质量的。下列三个选项是对不同分析领域进行了限值的默认设置。

- 低（Low）：主要应用于结构计算，即 Mechanical。
- 中（Medium）：主要应用于流体动力学和电磁场计算，即 CFD 和 Electromagnetics。
- 高（High）：主要应用于显式动力学计算，即 Explicit。

（6）Transition（过渡）：过渡是控制邻近单元增长比的设置选项，有以下两种设置。

- 快速（Fast）：在 Mechanical 和 Electromagnetics 网格中产生网格过渡。
- 慢速（Slow）：在 CFD 和 Explicit 网格中产生网格过渡。

（7）Span Angle Center（跨度中心角）：跨度中心角设定基于边的细化的曲度目标，网格在弯曲区域细分，直到单独单元跨越这个角。有以下几种选择：

- 粗糙（Coarse）：角度范围为-90°～60°；
- 中等（Medium）：角度范围为-75°～24°；
- 细化（Fine）：角度范围为-36°～12°。

需要注意的是，Span Angle Center 功能只能在 Advanced Size Function 选项关闭时可以使用。

图 3-25 和图 3-26 所示为当 Span Angle Center 选项分别设置为 Coarse 和 Fine 时的网格，从图中可以看出，当 Span Angle Center 选项设置由 Coarse 到 Fine 的过程中，中心圆孔的网格剖分数量增多，网格角度变小。

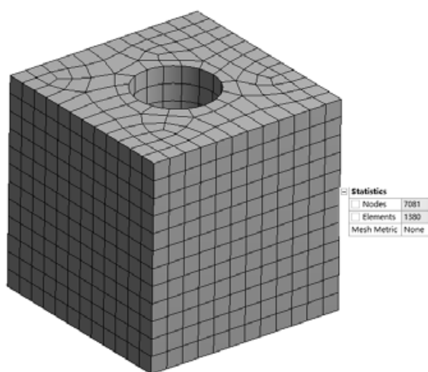


图 3-25　Span Angle Center=Coarse 时的网格

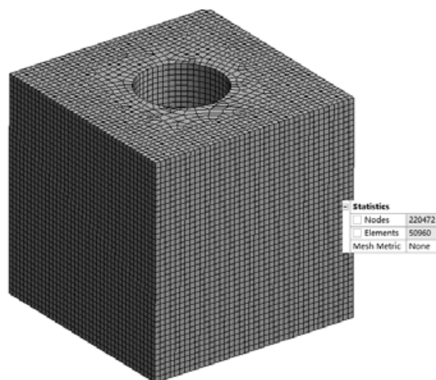


图 3-26　Span Angle Center=Fine 时的网格

3.1.5 Meshing 网格膨胀层设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板的 Inflation 中进行网格膨胀层的相关设置，图 3-27 所示为 Inflation（膨胀层）设置面板。

Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

图 3-27　膨胀层设置

（1）Use Automatic Inflation（使用自动控制膨胀层）：有三个可选择的选项，默认为 None（不使用自动控制膨胀层）。

- None（不使用自动控制膨胀层）：程序默认选项，即不需要人工控制程序自动进行膨胀层参数控制。
- Program Controlled（程序控制膨胀层）：人工控制生成膨胀层的方法，通过设置总厚度、第一层厚度、平滑过渡等来控制膨胀层生成的方法。
- All Faces in Chosen Named Selection（以命名选择所有面）：通过选取已经被命名的面来生成膨胀层。

（2）Inflation Option（膨胀层选项）：膨胀层选项对于二维分析和四面体网格划分的默认设置为 Smoothing Transition（平滑过渡），除此之外膨胀层选项还有以下几项可以选择。

- Total Thickness（总厚度）：需要输入网格最大厚度值（Maximum Thickness）；
- First Layer Thickness（第一层厚度）：需要输入第一层网格的厚度值（First Layer Height）；
- First Aspect Ratio（第一个网格的宽高比）：默认值为 5，读者可以根据需要对其进行修改。
- Last Aspect Ratio（最后一个网格的宽高比）：需要输入第一层网格的厚度值（First

Layer Height）；

（3）Transition Ratio（平滑比率）：程序默认值为 0.272，读者可以根据需要对其进行更改。

（4）Maximum Layers（最大层数）：程序默认值为 5，读者可以根据需要对其进行更改；

（5）Growth Rate（生长速率）：相邻两侧网格中内层与外层的比例，默认值为 1.2，读者可根据需要对其进行更改；

（6）Inflation Algorithm（膨胀层算法）：包括 Pre（前处理）和 Post（后处理）两种算法。

- Pre（前处理）：基于 Tgrid 算法，所有物理模型的默认设置。首先表面网格膨胀，然后生成体网格，可应用扫掠和二维网格的划分，但是不支持邻近面设置不同的层数。
- Post（后处理）：基于 ICEM CFD 算法，使用一种在四面体网格生成后作用的后处理技术，后处理选项只对 patching conforming 和 patch independent 四面体网格有效。

（7）View Advanced Options（显示高级选项）：当此选项为 Yes（开）时，Inflation（膨胀层）设置会增加图 3-28 所示的选项。

Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	Yes
Collision Avoidance	Stair Stepping
Gap Factor	0.5
Maximum Height over Base	1
Growth Rate Type	Geometric
Maximum Angle	140.0 °
Fillet Ratio	1
Use Post Smoothing	Yes
Smoothing Iterations	5

图 3-28　膨胀层高级选项

3.1.6 Meshing 网格 Patch Conforming 选项

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板的 Patch Conforming Options 中进行网格的相关设置。Patch Conforming Options 设置选项中有一个设置选项，如图 3-29 所示。

Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Advancing Front

图 3-29　Patch Conforming Options

Triangle Surface Mesher（三角形曲面划分器）：选项中有 Program Controlled 和 Advancing Front 两个选项可供选择。

3.1.7 Meshing 网格高级选项

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板的 Advanced 中进行网格高级选项的相关设置，图 3-30 所示为 Advanced（高级选项）设置面板。

Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For As...	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled

图 3-30　高级选项设置

（1）Shape Checking（形状检查）：针对不同物理场有不同的形状检查控制，即：

- Standard Mechanical（标准结构计算网格形状）：基于结构计算的网格形状控制，利用 Meshing 程序控制。
- Aggressive Mechanical（改进的结构计算网格形状）：基于改进结构计算的网格形状控制，利用 Meshing 程序控制。
- Electromagnetics（电磁场计算网格形状）：基于电磁计算的网格形状控制，利用 Emag 程序控制。
- CFD（流体动力学计算网格形状）：基于流体动力学计算的网格形状控制，利用 Fluent 或 CFX 程序控制。
- Explicit（显式动力学计算网格形状）：基于显式动力学计算的网格形状控制，利用 AUTODYN 或 LS DYNA 程序控制。
- None（无）：不使用网格形状控制命令。

（2）Element Midside Nodes（单元中间节点）：默认为 Program Controlled（程序控制），单元中间节点设置还可以利用以下两种方式。

- Dropped（去掉中间节点）：选择此选项后，在网格划分时将去除单元的中间节点。
- Kept（保留中间节点）：选择此选项后，在网格划分时将保留单元的中间节点。

（3）Straight Sided Elements（直边单元）：默认设置为 No（否），当模型中存在实体或者存在由 DM 得到的场体时进行显示。电磁分析时必须使用此命令。

（4）Number of Retries（重试次数）：设置网格剖分时失败的重新划分次数。

（5）Mesh Morphing（网格变形）：设置是否允许网格变形，即 Enable（允许）或 Disabled（不允许）。

3.1.8 Meshing 网格损伤设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板中的 Defeaturing（损伤）中进行网格损伤的相关设置，图 3-31 所示为 Defeaturing（损伤）设置面板。

Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	Yes
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default

图 3-31　Defeaturing（损伤）设置面板

（1）Pinch Tolerance（收缩容差）：网格生成时会产生缺陷，收缩容差定义了收缩控制，用户自己定义网格收缩容差控制值。收缩只能对顶点和边起作用，面和体不能收缩。

以下网格方法支持收缩特性。

- Patch Conforming 四面体；
- 薄实体扫掠；
- 六面体控制划分；
- 四边形控制表面网格划分；
- 所有三角形表面划分。

（2）Generate Pinch on Refresh（重新刷新时产生收缩）：默认为 Yes（是）。

（3）Automatic Mesh Based Defeaturing（基于损伤位置自动划分网格）：程序默认状态为 On（开），即针对损伤处网格，程序自动控制处理合理化网格生成。

（4）Defeaturing Tolerance（损伤容差）：程序默认为 Default 状态，用户可以根据工程需要自己设定损伤容差值来调整损伤网格，以满足工程需求。

3.1.9 Meshing 网格评估统计

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板中的 Statistics（统计）中进行网格统计及质量评估的相关设置，图 3-32 所示为 Statistics（统计）设置面板：

Nodes	7135
Elements	1512
Mesh Metric	None

None
Element Quality
Aspect Ratio
Jacobian Ratio
Warping Factor
Parallel Deviation
Maximum Corner Angle
Skewness
Orthogonal Quality

图 3-32　Statistics（统计）设置面板

（1）Nodes（节点数）：当几何模型的网格划分完成后，此处会显示节点数量。

（2）Elements（单元数）：当几何模型的网格划分完成后，此处会显示单元数量。

（3）Mesh Metric（网格质量检查准则）：默认为 None（无），用户可以从中选择相应的网格质量检查工具来检查划分网格质量的好坏。

1）Element Quality（单元质量检验）：选择单元质量选项后，此时在信息栏中会出现图 3-33 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

图中横坐标由 0 到 1，网格质量由坏到好，衡量准则为网格的边长比；图中纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条成正比；Element Quality 图表中的值越接近于 1，说明网格质量越好。

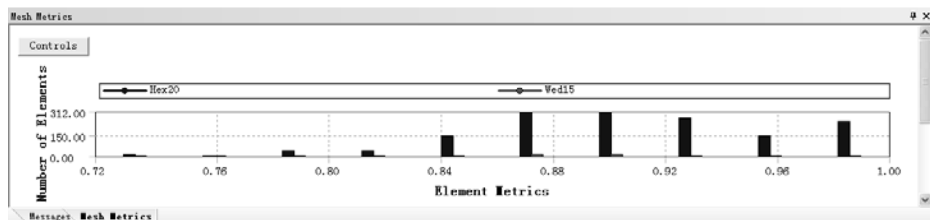


图 3-33　Element Quality 图表

单击图表中的 Controls 按钮，此时弹出图 3-34 所示的单元质量控制图表，在图表中可以进行单元数及最大最小单元设置。

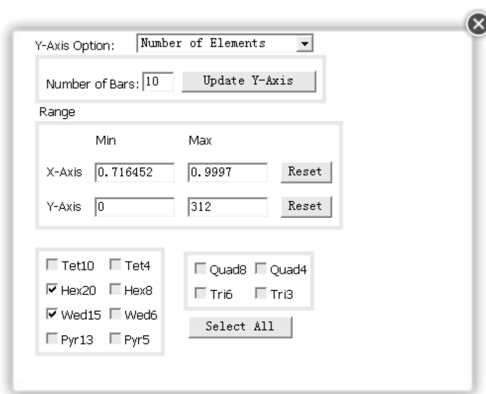


图 3-34　单元质量控制图表

2）Aspect Ratio（网格纵横比检验）：选择此选项后，在信息栏中会出现图 3-35 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

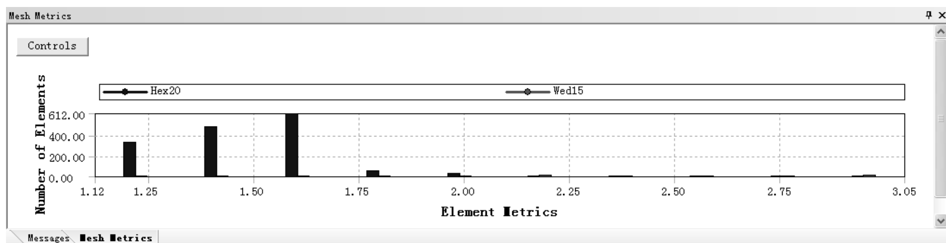


图 3-35　Aspect Ratio 图表

- 对于三角形网格来说，按法则判断：

如图 3-36 所示，从三角形的一个顶点引出对边的中线，另外两边中点相连，构成线段 *KR* 和 *ST*；分别做 2 个矩形如下：以中线 *ST* 为平行线，分别过点 *R*、*K* 构造矩形两条对边，另外两条对边分别过点 *S*、*T*；以中线 *RK* 为平行线，分别过点 *S*、*T* 构造矩形两条对边，另

两条对边分别过点 *R*、*K*。对另外两个顶点也如上面步骤做矩形，共 6 个矩形；找出各矩形长边与短边之比并开立方，数值最大者即为该三角形的 Aspect Ratio 值。

若 Aspect Ratio 值=1，三角形 *IJK* 为等边三角形，此时说明划分的网格质量最好。

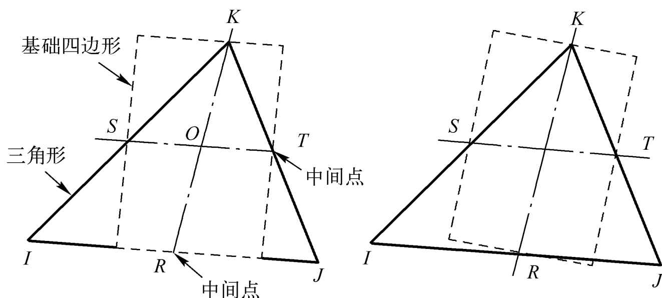


图 3-36　三角形判断法则

● 对于四边形网格来说，按法则判断：

如图 3-37 所示，如果单元不在一个平面上，各个节点将被投影到节点坐标平均值所在的平面上；画出两条矩形对边中点的连线，相交于一点 *O*；以交点 *O* 为中心，分别过 4 个中点构造两个矩形；找出两个矩形长边和短边之比的最大值，即为四边形的 Aspect Ratio 值。

若 Aspect Ratio 值=1，四边形 *IJKL* 为正方形，此时说明划分的网格质量最好。

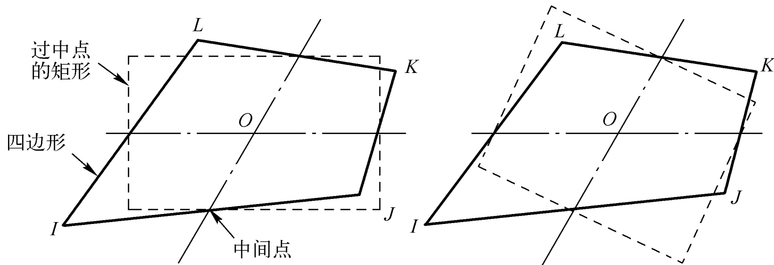


图 3-37　四边形判断法则

3）Jacobian Ratio（雅可比比率检验）：雅可比比率适应性较广，一般用于处理带有中节点的单元。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-38 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

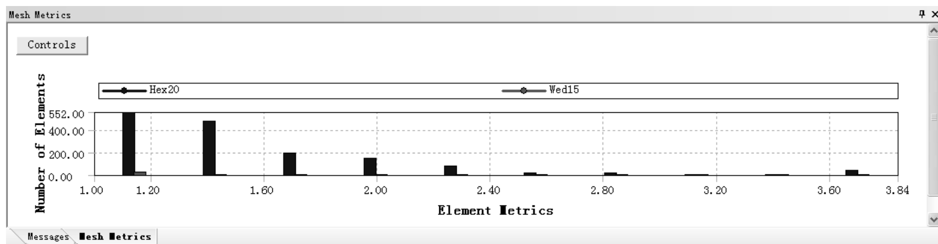


图 3-38　Jacobian Ratio 图表

Jacobian Ratio 计算法则如下：

计算单元内各样本点雅可比矩阵的行列式值R_j；雅可比值是样本点中行列式最大值与最小值的比值；若两者正负号不同，雅可比值将为-100，此时该单元不可接受。

● 三角形单元的雅可比比率。

如果三角形的每个中间节点都在三角形边的中点上，那么这个三角形的雅可比比率为1。图 3-39 所示为雅可比比率分别为 1、30、100 时的三角形网格。

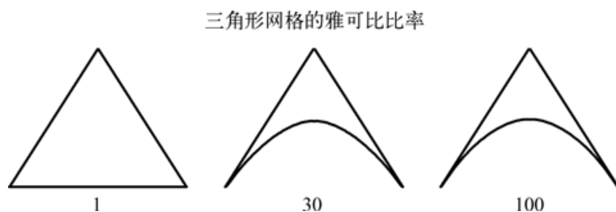


图 3-39 三角形网格 Jacobian Ratio

● 四边形单元的雅可比比率。

任何一个矩形单元或平行四边形单元，无论是否含有中间节点，其雅可比比率都为 1，如果垂直一条边的方向向内或者向外移动这一条边上的中间节点，可以增加雅可比比率，如图 3-40 所示为，为雅可比比率分别为 1、30、100 时的四边形网格。

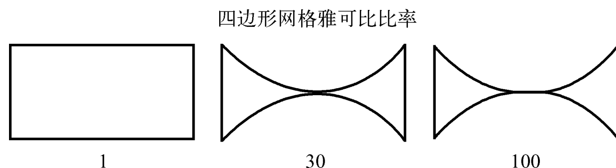


图 3-40 四边形网格 Jacobian Ratio

● 六面体单元雅可比比率。

满足以下两个条件的四边形单元和六面体单元的雅可比比率为 1：所有对边都相互平行；任何边上的中间节点都位于两个角点的中间位置。

如图 3-41 所示为雅可比比率分别为 1、30、100 时的四边形网格，此四边形网格可以生成雅可比比率为 1 的六面体网格。

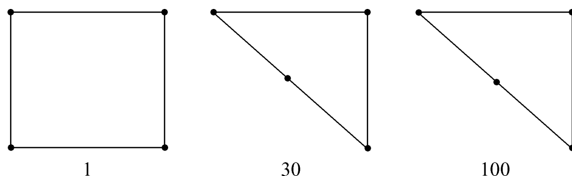


图 3-41 四边形网格 Jacobian Ratio

4）Wraping Factor（翘曲因子检验）：用于计算或者评估四边形壳单元、含有四边形面的块单元楔形单元及金字塔单元等，高扭曲系数表明单元控制方程不能很好地控制单元，需要重新划分。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-42 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

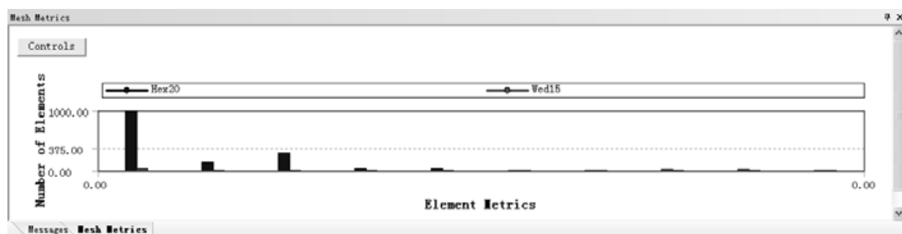


图 3-42　Wraping Factor 图表

图 3-43 所示的是二维四边形壳单元的扭曲系数逐渐增加的二维网格变化图形，从图中可以看出随着扭曲系数由 0.0 增大到 5.0，网格扭曲程度也在逐渐增加。

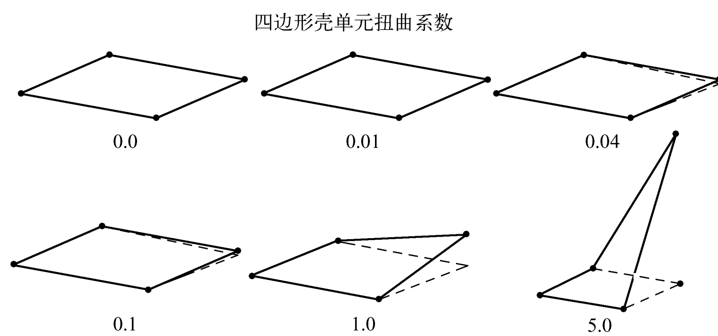


图 3-43　Wraping Factor 二维网格变化

对于三维网格的扭曲系数来说，分别比较六个面的扭曲系数，从中选择最大值作为扭曲系数，如图 3-44 所示。



图 3-44　Wraping Factor 三维块网格变化

5）Parallel Deviation（平行偏差检验）：计算对边矢量的点积，通过点积中的余弦值求出最大的夹角。平行偏差为 0 最好，此时两对边平行。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-45 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

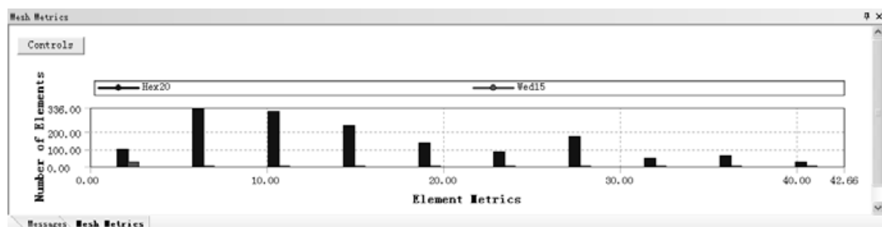


图 3-45　Parallel Deviation 图表

图 3-46 所示为当 Parallel Deviation（平行偏差）值从 0 增加到 170 时的二维四边形单元变化图形。

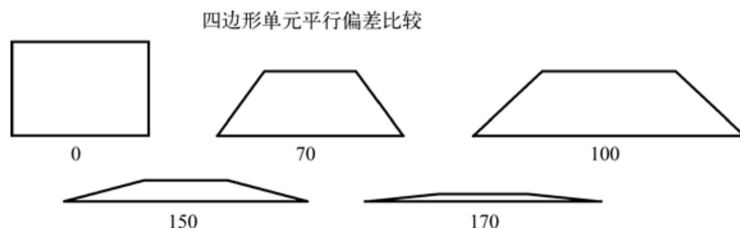


图 3-46　Parallel Deviation 二维四边形图形变化

6）Maximum Corner Angle（最大壁角角度）：计算最大角度。对三角形而言，60°最好，为等边三角形。对四边形而言，90°最好，为矩形。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-47 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

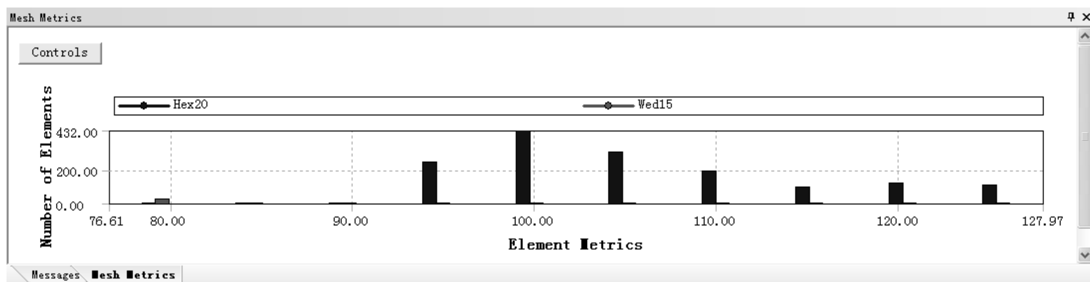


图 3-47　Maximum Corner Angle 图表

7）Skewness（偏斜检验）：网格质量检查的主要方法之一，有两种算法，即 Equilateral-Volume-Based Skewness 和 Normalized Equiangular Skewness。其值位于 0 和 1 之间，0 最好，1 最差。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-48 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

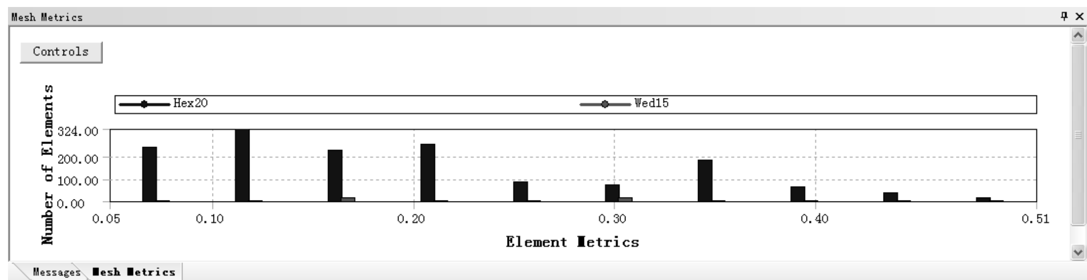


图 3-48　Skewness 图表

8）Orthogonal Quality（正交品质）：网格质量检查的主要方法之一，其值位于 0 和 1 之间，0 最差，1 最好。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-49 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

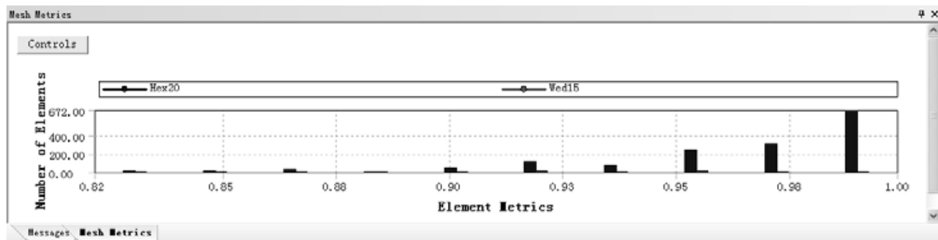


图 3-49 Orthogonal Quality 图表

除了上述的网格划分方法外，ANSYS Mechanical 平台还有以下两种方法。

- Match Control（面匹配网格划分）：面匹配网格划分用于在对称面上划分一致的网格，尤其适用于旋转机械（也称为透平机械）的旋转对称分析。因为旋转对称所使用的约束方程，其连接的截面上节点的位置除偏移外必须一致。
- Virtual Topology（虚拟拓扑工具）：虚拟拓扑工具允许为了更好地进行网格划分而合并面，Virtual Cell（虚拟单元）就是把多个相邻的面定义为一个面。虚拟单元可以把小面缝合到一个大的平面中，属于虚拟单元原始面上的内部线，不再影响网格划分，所以划分这样的拓扑结构可能和原始几何体会有所不同，对于其他操作（如加载面）就不被承认，而用虚拟单元代替。虚拟单元通常用于删除小特征，从而在特定的面上减小单元密度，或删除有问题的几何体，如长缝或是小面，从而避免网格划分失败。但是，要注意，虚拟单元改变了原有的拓扑模型，因此内部的特征如果有加载、支撑及求解等，将不再被考虑进去。

3.2 ANSYS Meshing 网格划分实例

以上简单介绍了 ANSYS Meshing 网格划分的基本方法及一些常用的网格质量评估工具，下面通过几个实例简单介绍一下 ANSYS Meshing 网格划分的操作步骤及常见的网格格式的导入方法。

3.2.1 应用实例 1——网格尺寸控制

模型文件	网盘\Chapter03\char03-1\PIPE_model.stp
结果文件	网盘\Chapter03\char03-1\PIPE_model.wbpj

图 3-50 所示为模型（含流体模型），本实例主要讲解网格尺寸和质量的全局控制及局部控制，包括高级尺寸功能中 Curvature、Proximity 和 Inflation 的使用。下面对其进行网格划分。

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-51 所示。

Step3：右键单击项目 A 中的 A2：Geometry，如图 3-52 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse。

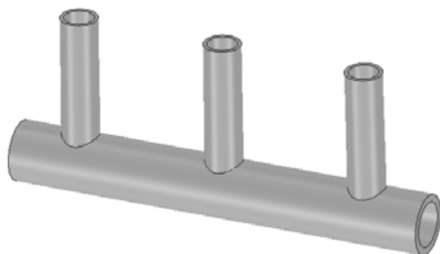


图 3-50　模型

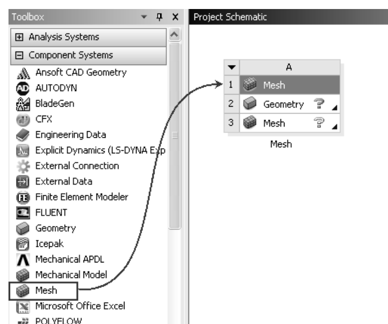


图 3-51　创建分析项目 A

Step4：如图 3-53 所示，在弹出的“打开”对话框中选择 PIPE_Model.stp 格式文件，然后单击“打开”按钮。

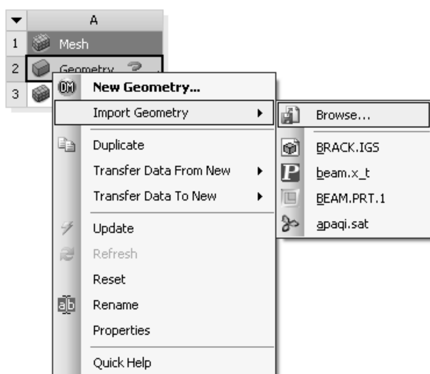


图 3-52　加载几何文件



图 3-53　选择文件并打开

Step5：双击项目 A 中的 A2：Geometry 栏，此时会弹出图 3-54 所示的 A：Mesh-DesignModeler 窗口。

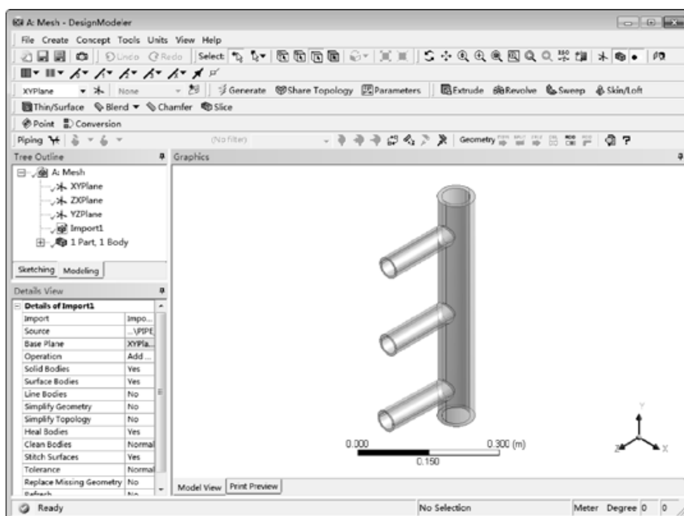


图 3-54　显示几何模型

Step6： 填充操作。依次选择菜单栏中的 Tools→Fill 命令，在图 3-55 所示的 Details View 面板中进行如下操作：在 Faces 栏中确保模型的所有内表面被选中；单击工具栏中的 Generate 按钮生成实体。

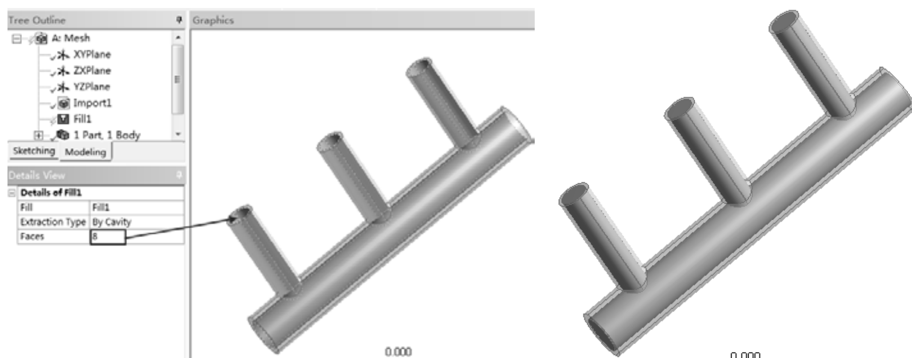


图 3-55　填充

Step7： 实体命名。右键单击模型树中图 3-56 所示的 Solid，在弹出的快捷菜单中选择 Rename 命令，在命名区域中输入名字为 PIPE。

Step8： 以同样的操作将另外一个实体命名为 water，命名完成后如图 3-57 所示。

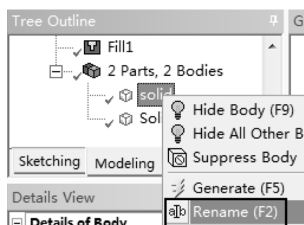


图 3-56　命名操作 1

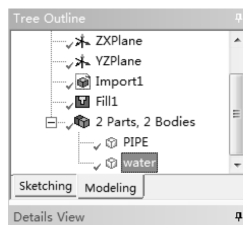


图 3-57　命名操作 2

Step9： 单击 DesignModeler 窗口右上角的☒按钮，关闭 DesignModeler 窗口。

Step10： 回到 Workbench 主窗口，如图 3-58 所示，单击 A3（Mesh）栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令。

Step11： Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-59 所示。

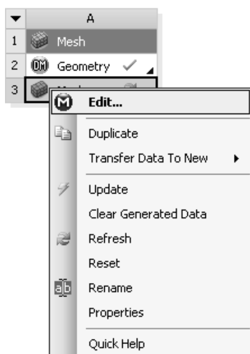


图 3-58　载入 Mesh

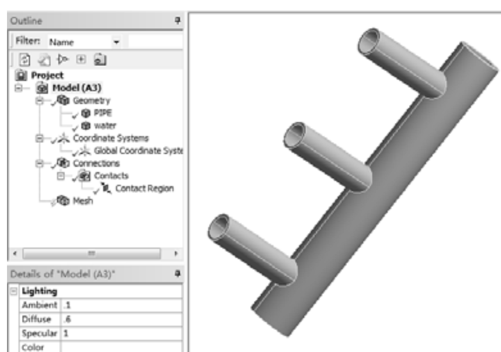


图 3-59　Mesh 平台中几何模型



Step12：选择 Outline 中的 Project→Modal（A3）→Geometry→PIPE 命令，在图 3-60 所示的 Details of“PIPE”面板中做如下设置：

在 Material→Fluid/Solid 栏中将默认的 Defined By Geometry（Solid）修改为 Solid。

Step13：以同样的操作，将 water 的 Material 属性从默认的 Defined By Geometry（Solid）修改为 Fluid，如图 3-61 所示。

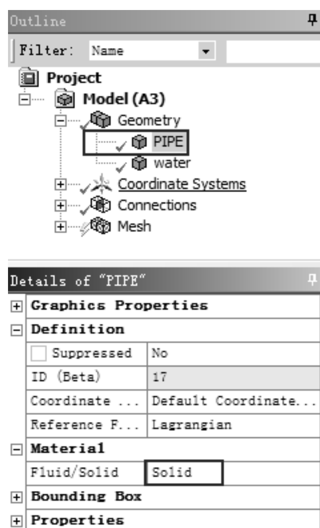


图 3-60　更改属性 1

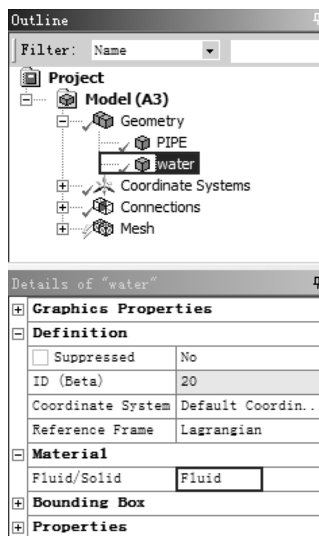


图 3-61　更改属性 2

Step14：右键单击 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-62 所示的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

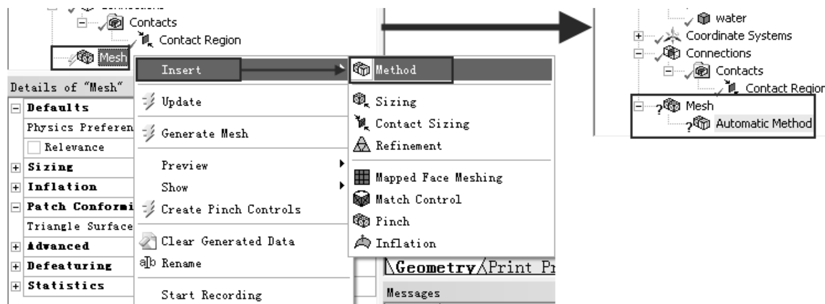


图 3-62　插入 Method 命令

Step15：在图 3-63 所示的 Details of“Automatic method”面板中，在绘图区选择 PIPE 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中；在 Definition→Method 栏中选择 Tetrahedrons（四面体网格划分）；在 Algorithm 栏中选择 Patch Conforming 选项。

注意：当以上选项选择完毕后，Details of“Automatic Method”会变成 Details of“Patch ConformingMethod”-Method，以后操作都会出现类似情况，不再赘述。

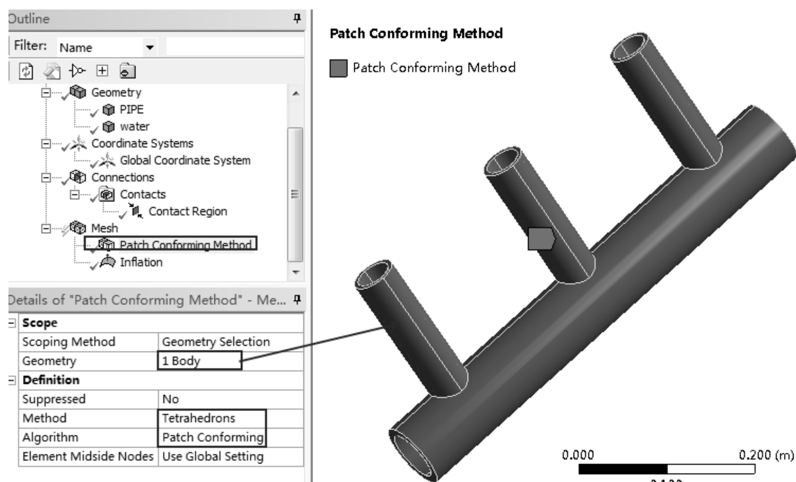


图 3-63　网格划分方法

Step16：右键单击 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-64 所示快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Inflation 命令。

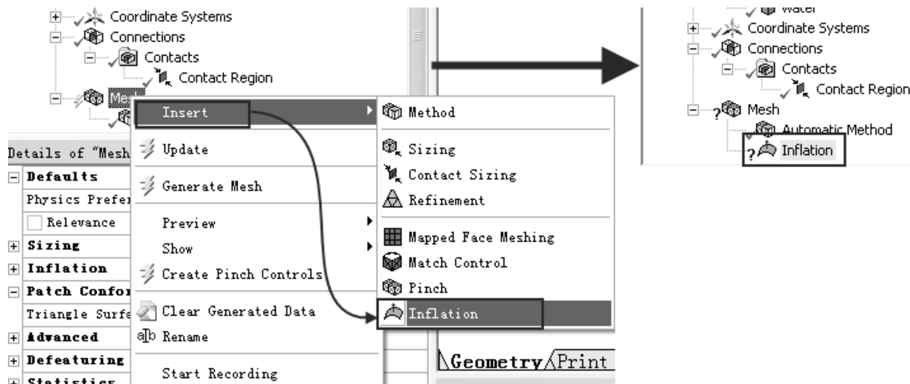


图 3-64　网格划分方法

Step17：右键单击 Project→Modal（A3）→Geometry→PIPE 命令，在弹出的图 3-65 所示的快捷方式中选择 Hide Body（F9）命令或者按〈F9〉键，隐藏 PIPE 几何。

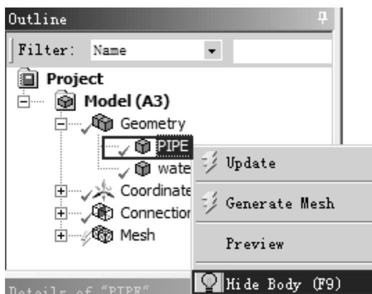


图 3-65　隐藏几何实体

Step18：选择 Outline 中的 Inflation 命令，如图 3-66 所示，在下面出现的 Details of“Inflation”面板中进行如下设置：选择 water 几何实体，然后在 Scope→Geometry 栏中单击 Apply；选择三圆柱的外表面，然后在 Definition→Boundary 栏中单击 Apply；其余选项默认即可，完成 Inflation（膨胀）面的设置。

Step19：右键单击 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-67 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

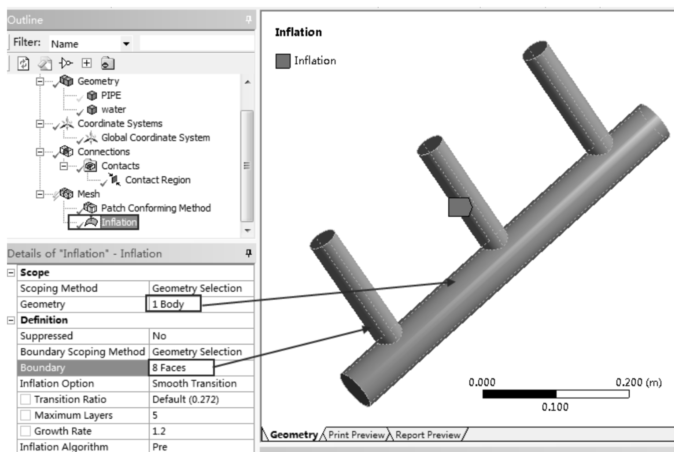


图 3-66　膨胀层设置

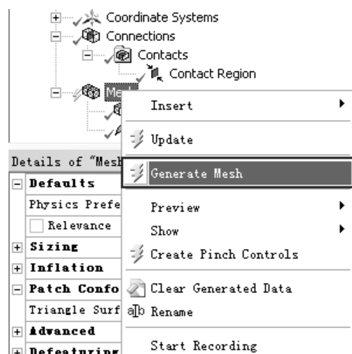


图 3-67　划分网格

Step20：此时会弹出图 3-68 所示的网格划分进度栏，进度栏中显示出网格划分的进度条。

Step21：划分完成的网格如图 3-69 所示。

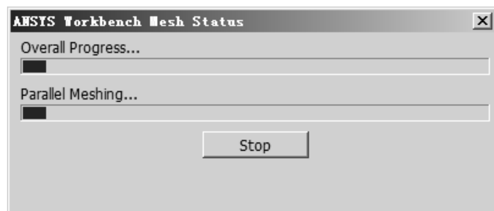


图 3-68　网格划分进度条

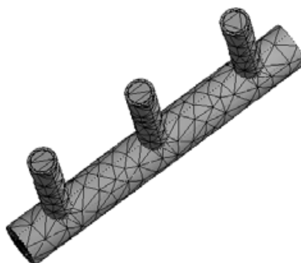


图 3-69　网格模型

Step22：如图 3-70 所示，在 Details of“Mesh”面板的 Statistics 中可以看到节点数和单元数以及扭曲程度。

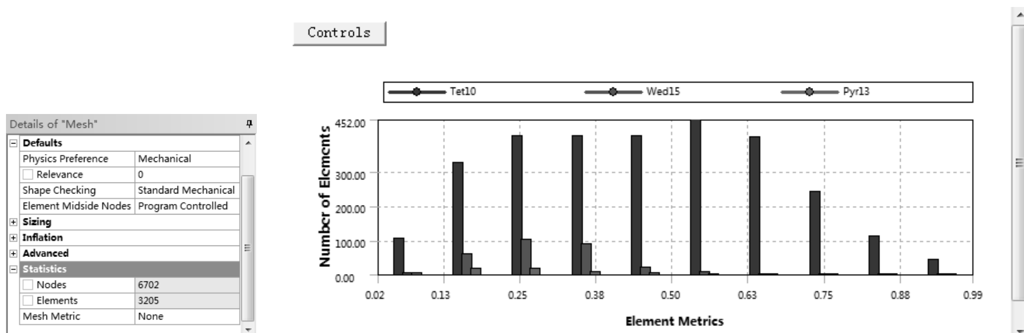


图 3-70　网格数量统计

Step23：如图 3-71 所示，将物理参照改为 CFD，其余设置不变，划分网格。

Step24：划分完成的网格及网格统计数据如图 3−72 所示。



图 3−71　修改物理参照　　　　图 3−72　CFD 中的网格及数量

Step25：如图 3−73 所示，在几何绘图窗口单击 Z 坐标，使几何正对读者，单击工具栏中的图标，鼠标单击几何模型上端然后向下拉出一条直线，在下端单击确定。

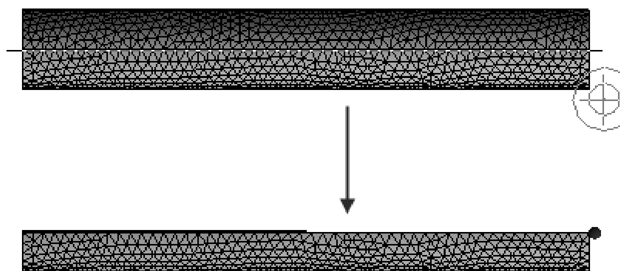


图 3−73　创建截面

Step26：如图 3−74 所示，旋转几何网格模型，此时可以看到截面网格。

Step27：如图 3−75 所示，单击右下角 Section Plane 面板中的图标，此时可以显示截面网格的完整网格。

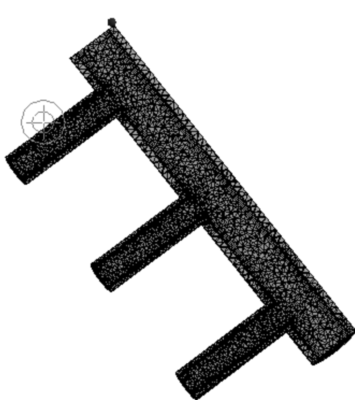


图 3−74　截面网格

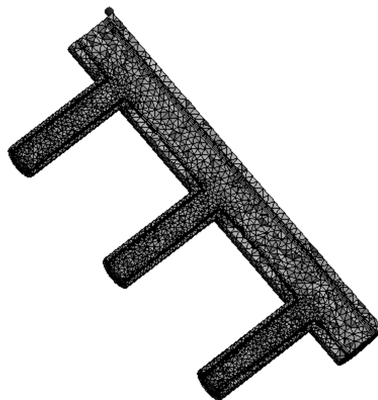


图 3−75　截面完整网格显示

Step28：如图 3−76 所示，在 Details of“Mesh”面板中将 Size Function 选项改为 On: Proximity and Curvature 后，划分完成后的网格。

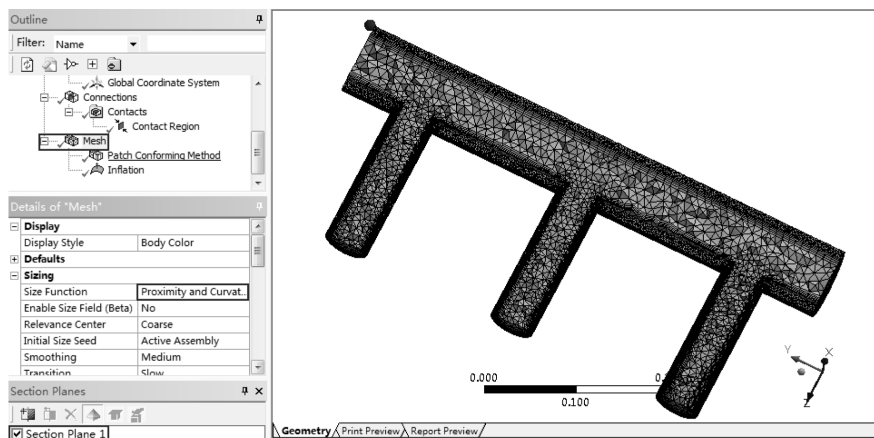


图 3-76　截面完整网格显示

Step29：单击 Meshing 平台上的“关闭”按钮，关闭 Meshing 平台。

Step30：返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出来的“另存为”对话框中输入名字为 PIPE_Model，单击“保存”按钮。

3.2.2 应用实例 2——扫掠网格划分

模型文件	网盘\Chapter03\char03-2\PIPE_SWEEP.stp
结果文件	网盘\Chapter03\char03-2\PIPE_SWEEP.wbpj

本实例主要讲解通过扫掠网格的映射面划分的使用，下面对其进行网格剖分（见图 3-77）。

Step1：启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-78 所示。

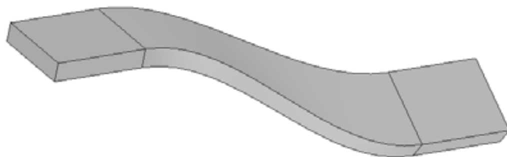


图 3-77　模型

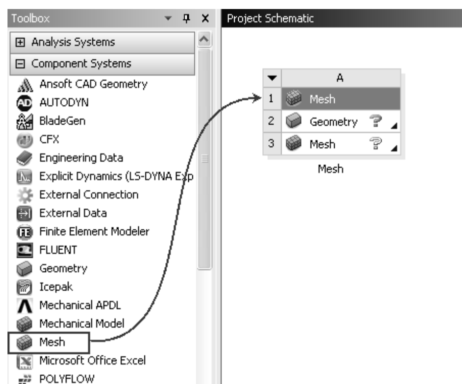


图 3-78　创建分析项目 A

Step3：右键单击项目 A 中的 A2：Geometry，如图 3-79 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse。

Step4：如图 3-80 所示，在弹出的“打开”对话框中，在文件类型栏中选择 STEP 格

式；选择 PIPE_SWEEP.stp 格式文件，然后单击“打开”按钮。

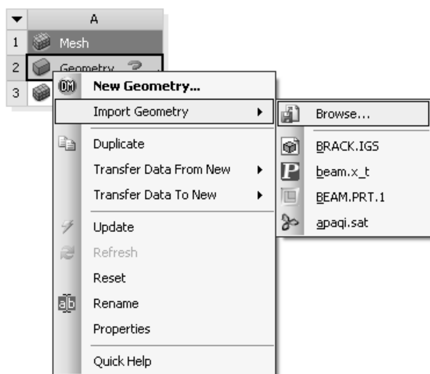


图 3-79　加载几何文件



图 3-80　选择文件名

Step5：双击项目 A 中的 A2：Geometry 栏，此时会弹出图 3-81 所示的 A：Mesh-DesignModeler 平台，单击 Generate 按钮。

Step6：此时将生成图 3-82 所示的几何实体。

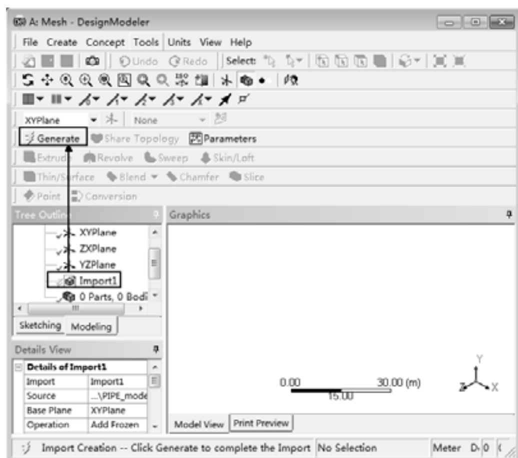


图 3-81　A：Mesh-DesignModeler 平台

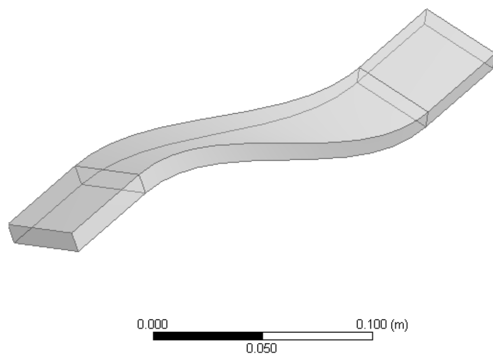


图 3-82　几何模型

Step7：单击 DesignModeler 平台右上角的按钮，关闭 DesignModeler 平台。

Step8：回到 Workbench 主窗口，如图 3-83 所示，单击 A3：Mesh 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令。

Step9：Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-84 所示。

Step10：右键单击 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-85 所示的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

Step11：在图 3-86 所示的 Details of“Automatic Method”面板中作如下操作：在绘图区选择 1 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中；在 Definition→Method 栏中选择 Sweep（扫掠）；在 Src/Trg Selection 栏中选择 Manual Source 选项；在 Source 栏中确保一个端面被选中，单

击 Generate 生成网格。

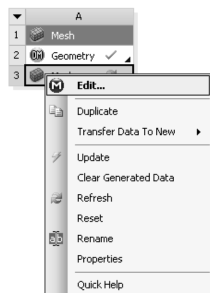


图 3-83　载入 Mesh

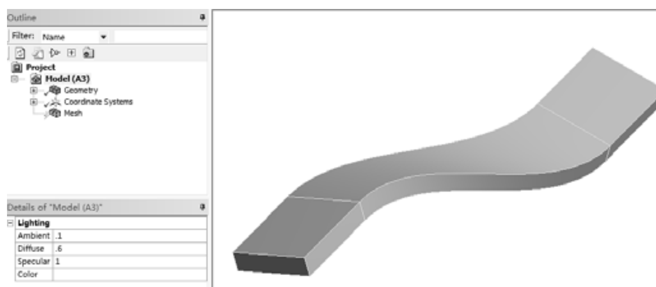


图 3-84　Mesh 平台中几何模型

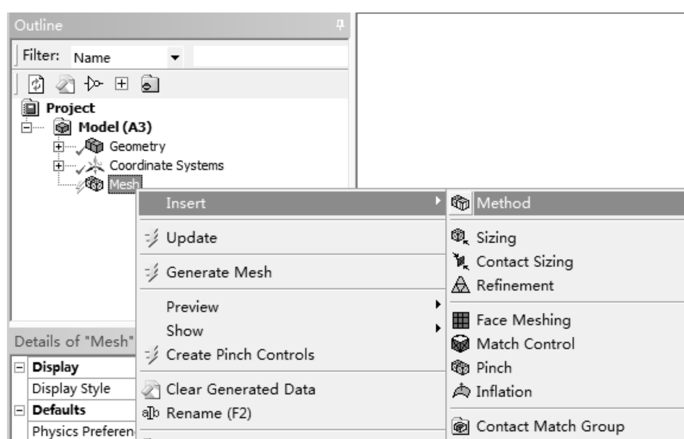


图 3-85　插入 Method 命令

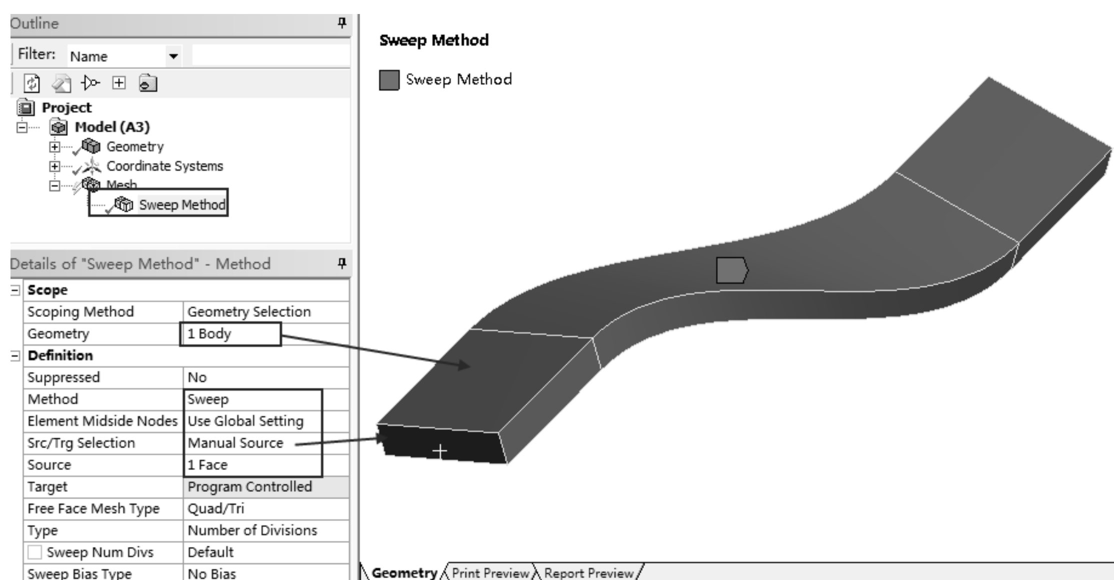


图 3-86　网格划分方法

Step12： 右键单击 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-87 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

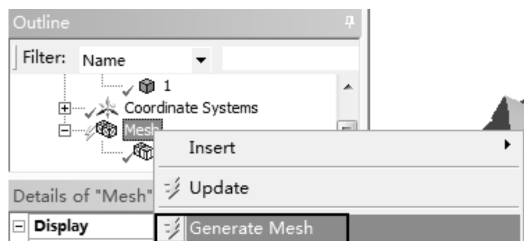


图 3-87　划分网格

Step13： 此时会弹出图 3-88 所示的网格划分进度栏，进度栏中显示出网格划分的进度条。

Step14： 划分完成的网格如图 3-89 所示。

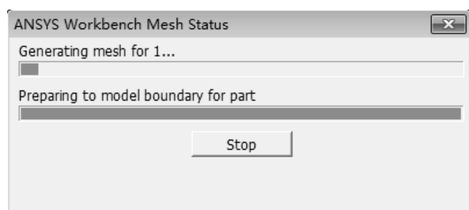


图 3-88　网格划分进度条

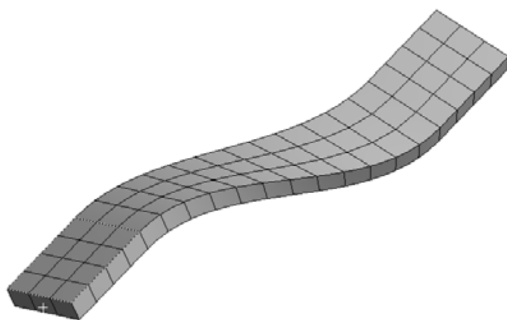


图 3-89　网格模型

Step15： 如图 3-90 所示，在 Details of“Mesh”面板的 Statistics 中可以看到节点数和单元数以及扭曲程度。

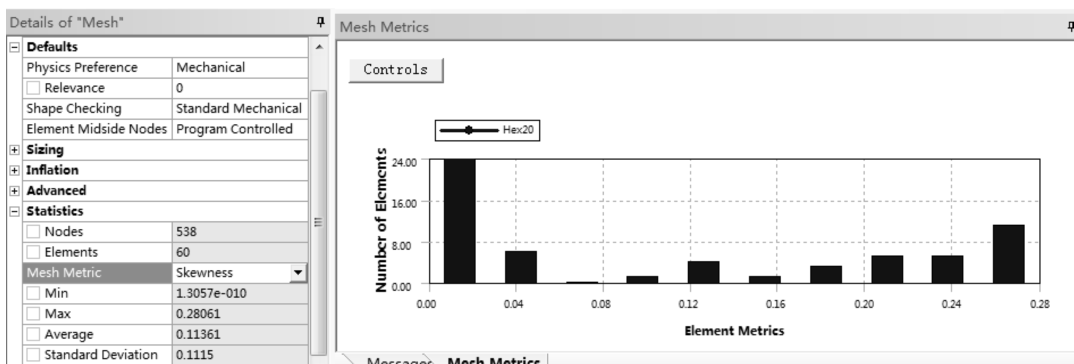


图 3-90　网格数量统计

Step16： 如图 3-91 所示，插入一个 Sizing 尺寸控制命令，并将网格大小设置为 5.e-003m。

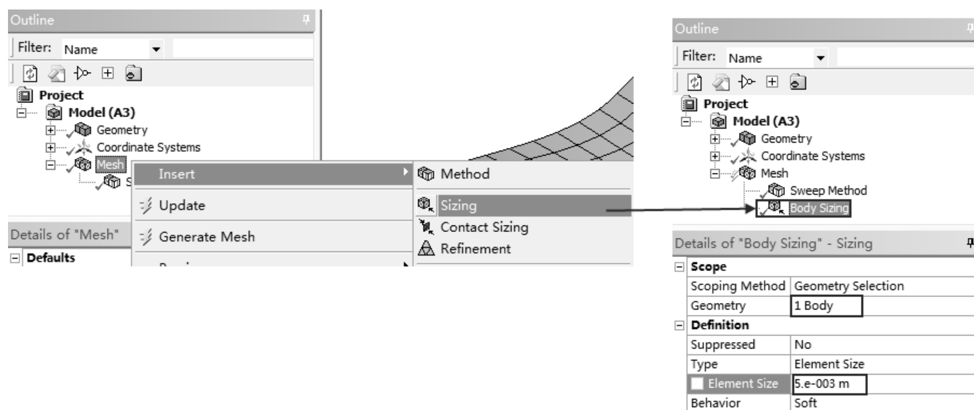


图 3-91　设置体网格大小

Step17：划分完成的网格及网格统计数据如图 3-92 所示。

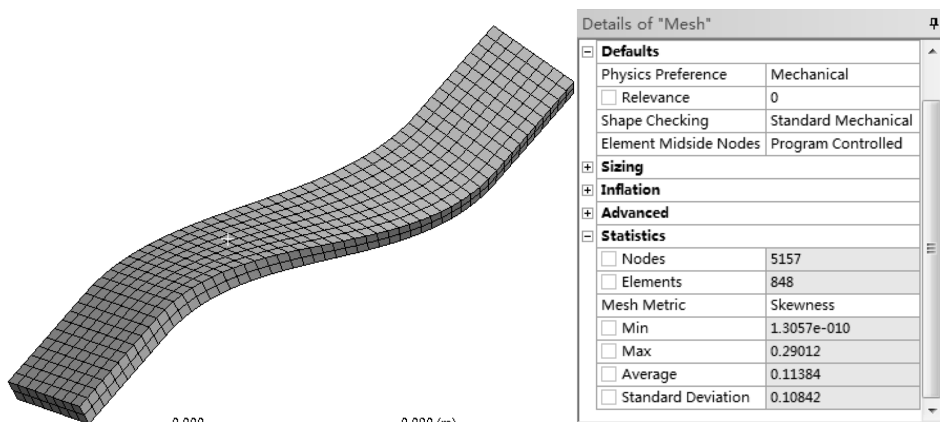


图 3-92　CFD 中的网格及数量

Step18：单击 Meshing 平台上的关闭按钮，关闭 Meshing 平台。

Step19：返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出的“另存为”对话框中输入名字为 PIPE_SWEEP，单击“保存”按钮。

3.2.3 应用实例 3——多区域网格划分

模型文件	网盘\Chapter03\char03-3\MULTIZONE.x_t
结果文件	网盘\Chapter03\char03-3\MULTIZONE.wbpj

图 3-93 所示为某三通管道模型，本实例主要讲解多区域方法的基本使用，对于具有膨胀层的简单几何生成六面体网格，在生成网格的时候，多区扫掠网格划分器自动选择源面。下面对其进行网格剖分。

Step1：启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-94 所示。

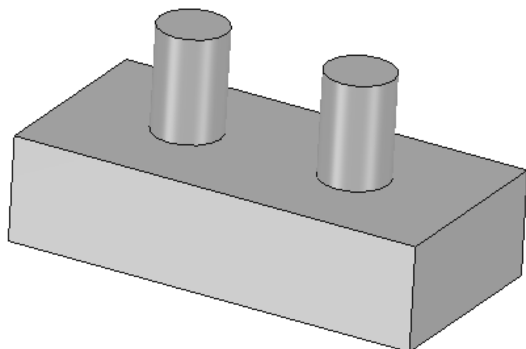


图 3-93　三通管道模型

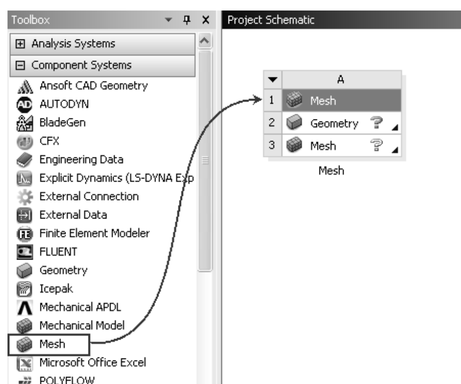


图 3-94　创建分析项目 A

Step3：右键单击项目 A 中的 A2：Geometry，如图 3-95 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse。

Step4：如图 3-96 所示，在弹出的“打开”对话框中选择 MULTIZONE.STEP 格式文件，然后单击“打开”按钮。

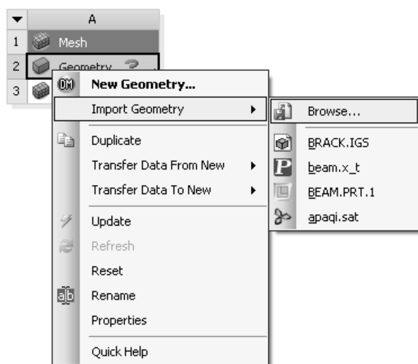


图 3-95　加载几何文件



图 3-96　选择文件名

Step5：双击项目 A 中的 A2：Geometry 栏，此时会弹出图 3-97 所示的 DesignModeler 平台。

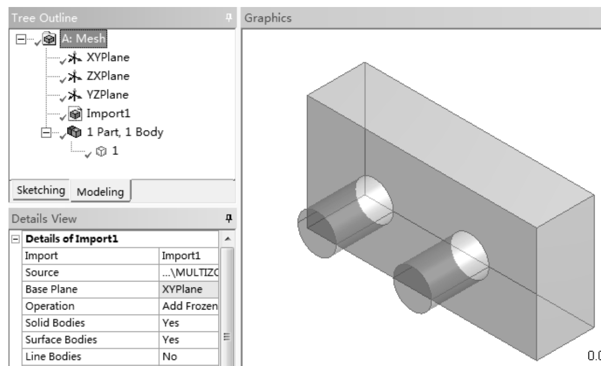


图 3-97　显示几何模型

Step6：单击 DesignModeler 平台右上角的☒按钮，关闭 DesignModeler 平台。

Step7：回到 Workbench 主窗口，如图 3-98 所示，单击 A3：Mesh 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令。

Step8：Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-99 所示。

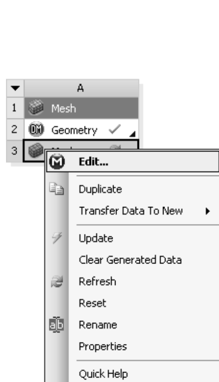
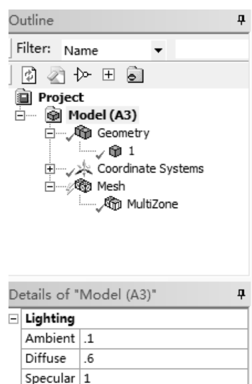


图 3-98　载入 Mesh



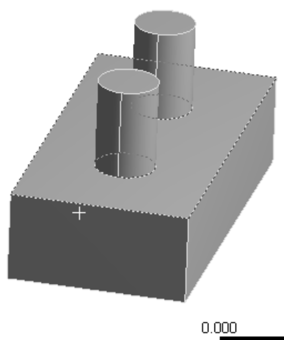


图 3-99　Mesh 平台中的几何模型

Step9：右键单击 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-100 所示的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

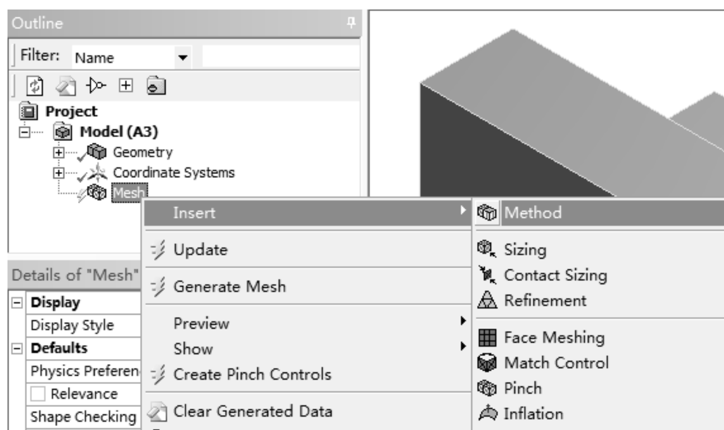


图 3-100　插入 Method 命令

Step10：在图 3-101 所示的 Details of“MultiZone”-Method 面板中进行如下操作：

在绘图区选择 Solid 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中；在 Definition→Method 栏中选择 MultiZone（多区域）；在 Element Midside Nodes 栏中选择 Use Global Setting；在 Src/Trg Selection 栏中选择 Manual Source 选项；在 Source 栏中确保图示的四个面被选中；其余选项保持默认即可。

注意：当以上选项选择完毕后，Details of“Automatic Method”会变成 Details of“MultiZone”-Method，以后操作都会出现类似情况，不再赘述。

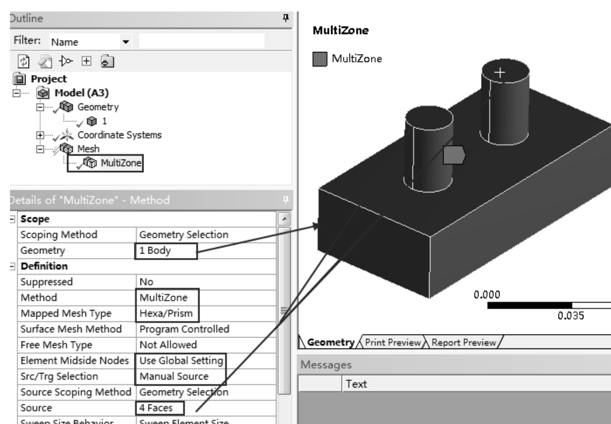


图 3-101　网格划分方法

Step11：右键单击 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-102 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step12：划分完成的网格如图 3-103 所示。

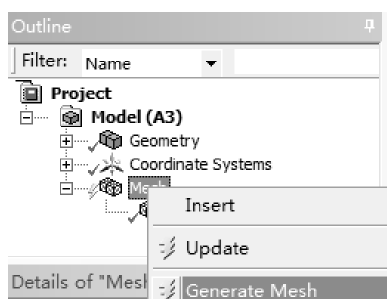


图 3-102　划分网格

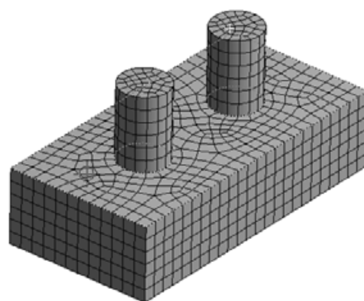


图 3-103　网格模型

Step13：右键单击 Outline→Project→Mesh→MultiZone 命令，在弹出的图 3-104 所示的快捷菜单中选择 Delete 命令，删除 MultiZone 命令。

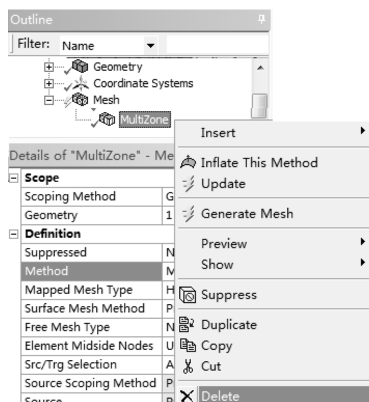


图 3-104　删除 MultiZone 命令



Step14： 右键单击 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-105 所示的快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Inflation 命令。

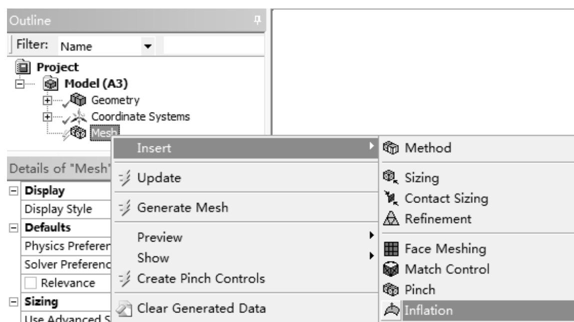


图 3-105　网格划分方法

Step15： 单击 Outline 中的 Inflation 命令，如图 3-106 所示，在下面出现的 Details of "Inflation" 面板中作如下设置：选择 Solid 几何实体，然后设置 Scope→Geometry 为 1Body；选择圆柱和长方体的外表面，然后设置 Definition→Boundary 为 1Body 8Faces；其余选项默认即可，完成 Inflation（膨胀）面的设置。

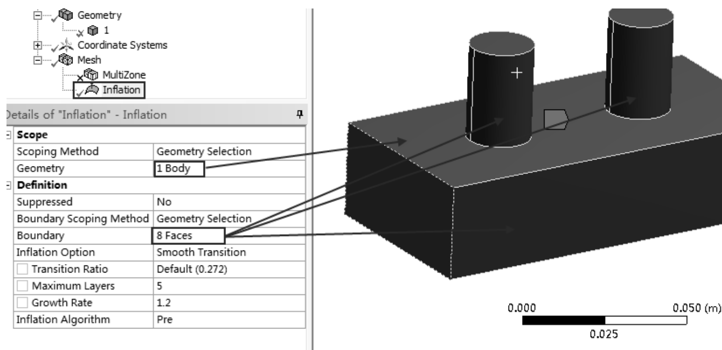


图 3-106　膨胀面设置

Step16： 右键单击 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-107 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step17： 划分完成的网格如图 3-108 所示。

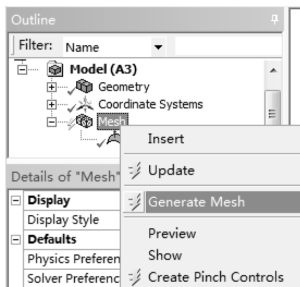


图 3-107　划分网格

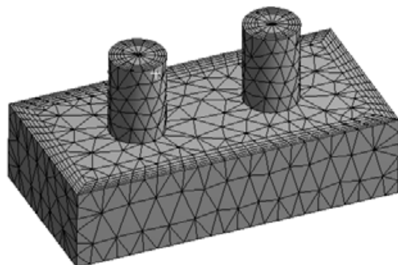


图 3-108　膨胀层网格划分

Step18：单击 Meshing 平台上的“关闭”按钮，关闭 Meshing 平台。

Step19：返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出的“另存为”对话框中输入名字为 MULTIZONE，单击“保存”按钮。

3.2.4 应用实例 4——网格移动

模型文件	网盘\Chapter03\char03-4\Mesh_MOVE.stp
结果文件	网盘\Chapter03\char03-4\Mesh_MOVE.wbpj

ANSYS 是功能强大的多物理场分析软件，其在各个分析领域都有非常出色的表现，在网格划分方面也做得比较出色，下面针对 ANSYSMeshing 划分完的网格位置修改进行简单介绍，模型如图 3-109 所示。

Step1：启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-110 所示。

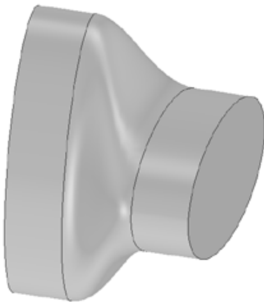


图 3-109　三通管道模型

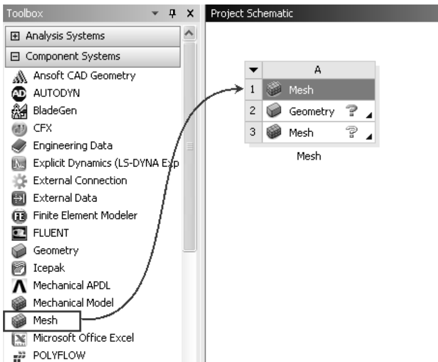


图 3-110　创建分析项目 A

Step3：右键单击项目 A 中的 A2：Geometry，如图 3-111 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令。

Step4：如图 3-112 所示，在弹出的“打开”对话框中选择 Mesh_MOVE.stp 格式文件，然后单击“打开”按钮。

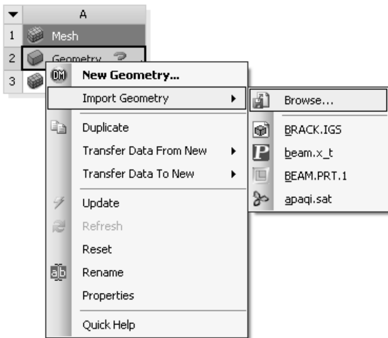


图 3-111　加载几何文件



图 3-112　选择文件名

Step5：双击项目 A 中的 A2：Geometry 栏，此时会弹出图 3-113 所示的 DesignModeler 平台，从图中可以看出两个椭圆柱中间过渡的结构几何形状很复杂，这部分作为网格划分的重点来考虑。

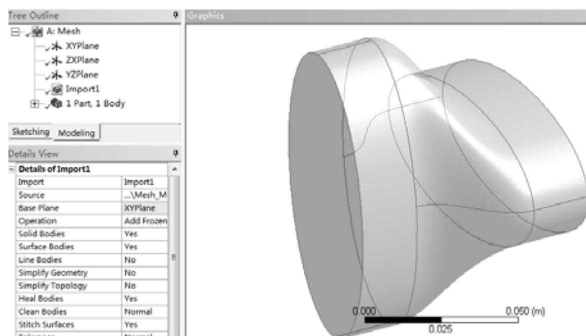


图 3-113　几何模型显示

Step6：单击 DesignModeler 平台右上角的⊠按钮，关闭 DesignModeler 平台。

Step7：回到 Workbench 主窗口，如图 3-114 所示，单击 A3：Mesh 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令。

Step8：Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-115 所示。

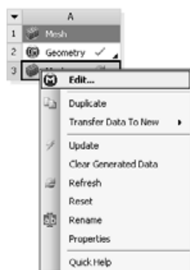


图 3-114　载入 Mesh

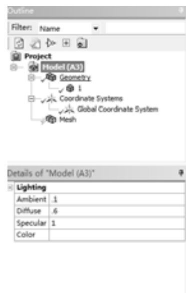


图 3-115　Mesh 平台中几何模型

Step9：右键单击 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-116 所示的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

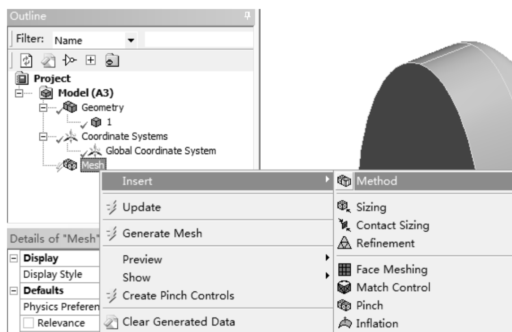


图 3-116　插入 Method 命令

Step10：在图 3–117 所示的 Details of “Automatic method”-Method 面板中进行如下操作：在绘图区选择 Solid 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中；在 Definition→Method 栏中选择 Automatic（自动）；其余选项保持默认即可。

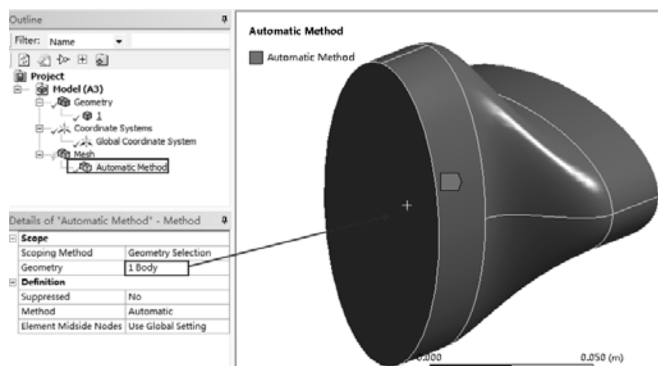


图 3–117 网格划分方法

Step11：右键单击 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3–118 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step12：划分完成的网格如图 3–119 所示。

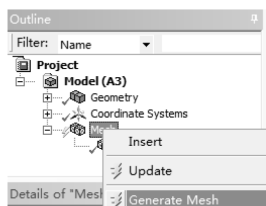


图 3–118 划分网格

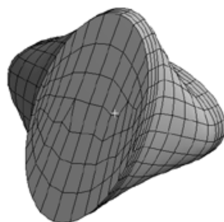


图 3–119 网格模型

Step13：右键单击 Outline→Project→Mesh→Insert→Node Move 命令，如图 3–120 所示，创建节点移动命令。

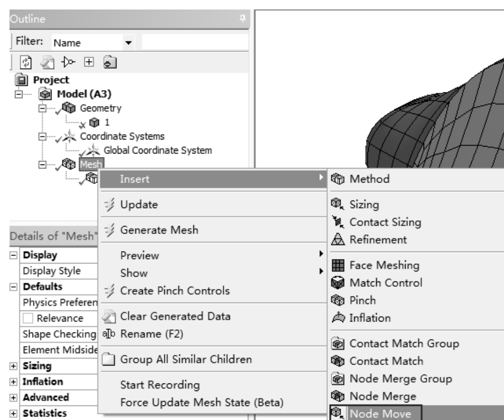
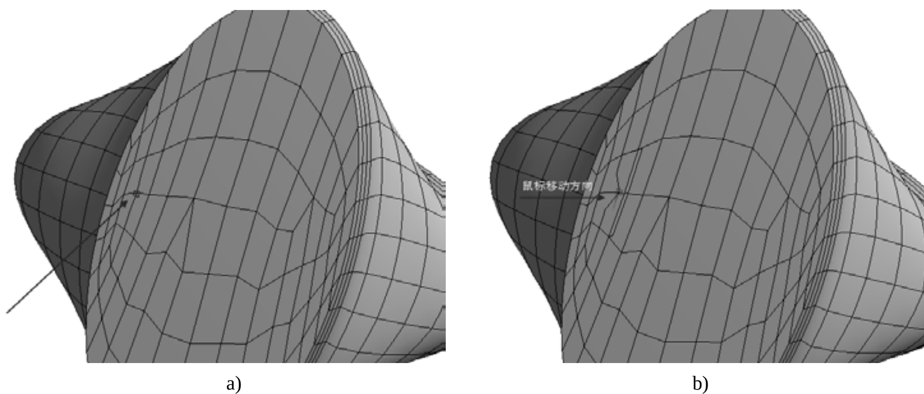


图 3–120 节点移动



Step14：单击工具栏中的命令，将单选功能切换到单选节点命令，单击图 3-121a 所示的节点，此时看到被选中的节点被加亮，按图 3-121b 所示的箭头方向移动鼠标，此时节点被移动到新的位置。



a)　　b)

图 3-121　节点移动方法

Step15：单击 Mesh 命令就可以显示图 3-122 所示的移动后的网格。

注意：本操作仅为向读者介绍网格中节点移动的操作方法。

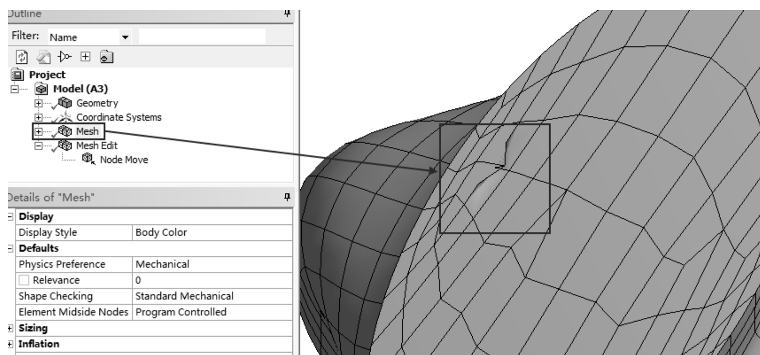


图 3-122　效果

Step16：单击 Meshing 平台上的关闭按钮，关闭 Meshing 平台。

Step17：返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出的“另存为”对话框中输入名字为 Mesh_MOVE，单击“保存”按钮。

3.3　本章小结

本章详细介绍了 ANSYS Workbench 平台网格划分模块的一些相关参数设置和网格质量检测方法，并通过 4 个网格划分实例介绍了不同类型网格划分的方法及操作过程，最后通过两个实例介绍了外部网格的导入方法。



第 4 章　边界条件与后处理

边界条件是指在几何模型边界上方程组的解应该满足的条件，在热分析中边界条件指的是热对流、热辐射等。

后处理技术以其优秀的计算数据处理能力，被众多有限元软件计算软件所应用。结果的输出为了方便对计算数据的处理而产生，减少了对大量数据的分析过程，可读性强，理解方便。

有限元计算的最后一个关键步骤为数据的后处理，通过后处理，使用者可以很方便地对结构的计算结果进行相关操作，以输出感兴趣的结果，如变形、应力、应变等。另外，对于一些高级用户，还可以通过简单的代码编写，输出一些特殊的结果。

ANSYS Workbench 17.0 平台的后处理功能非常丰富，可以完成众多类型的后处理，本章将详细介绍 ANSYS Workbench 17.0 新版软件的后处理设置与操作方法。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
ANSYS Workbench 后处理的意义		√		
ANSYS Workbench 后处理工具使用方法			√	√
ANSYS Workbench 用户自定义后处理			√	√
ANSYS Workbench 后处理数据判断方法			√	√

4.1　ANSYS Workbench 17.0 边界条件

ANSYS Workbench 热分析中常用的符号及单位表达式见表 4−1。

表 4−1　热分析符号及单位

名　称	国 际 单 位	英 制 单 位	ANSYS
长度 L	m	ft	Length
时间 t	s	s	Time
质量 m	kg	lbm	Mass
温度 T	℃	*F	Temperature
力 F	N	lbf	Force
能量（热量）J	J	BTU	Joule
功率（热流率）Q	W	BTU/sec	Heat Flow
热流密度 q	W/m^2	BTU/sec−ft^2	Heat Flux
生热速率 $\dot{q}$	W/m^3	BTU/sec−ft^3	Internal Heat Generation
导热系数 λ	W/m−℃	BTU/sec−ft−*F	Thermal Conductivity

（续）

名　　称	国际单位	英制单位	ANSYS
对流系数 *h*	W/m^2–℃	BTU/sec–ft^2–*F	Film Coefficient
密度 ρ	kg/m^3	Lbm/ft^3	Density
比热 *c*	J/kg–℃	BTU/lbm–*F	Specific Heat
焓 *H*	J/m^3	BTU/ft^3	Enthalpy

ANSYS Workbench 平台热分析中除了建立几何模型和网格划分外，作为一个完整的分析还必须有材料属性和接解设置（如果有）。

1. 材料属性

（1）在稳态分析中，必须定义热传导系数。热传导系数可以是各向同性或各向异性，可以是常数或者与温度相关；

（2）瞬态热分析中，必须定义热传导系数、密度和比热。热传导系数可以各向同性或者各向异性，所有属性可以是常数或者与温度相关。

2. 接触设置（如果有）

当导入实体零件组成的装配体时，实体间的接触区将会被自动创建。面与面或面与边接触允许实体零件间的边界上有不匹配的网格。

每个接触区都能用到接触面和目标面的概念。接触区的一侧由接触面组成，另一侧面由目标面组成。当一侧为接触面而另一侧为目标面时，称为反对称接触；另一方面，如果两侧都被指定成接触面或者目标面，则称为对称接触。在热分析中，指定哪一侧是接触面，哪一侧是目标面并不重要。在接触的法向上允许有接触面和目标面间的热流。接触实现了装配体中零件间的传热。

热量在接触区沿着接触法向流动，不管接触定义如何，只要接触法向上有接触单元，热量就会流动。在接触面与目标界面中，不考虑热量的扩散；而在壳或者实体单元内的接触面或者目标面上，由于傅里叶定律，需要考虑热量扩散的作用。

如果零件初始有接触，零件间就会发生传热；如果零件初始不接触，零件间将不会互相传热。对于不同的接触类型，热量是否会在接触面和目标面间传递参见表 4–2。

表 4–2　接触区传热

接触类型	接触区是否传热		
	初始接触	弹球区内	弹球区外
绑定、不分离	是	是	否
粗糙、无摩擦、摩擦	是	否	否

接触的弹球（Pinball）区域自动设置为一个相对较小的值，以调和模型中可能出现的小间隙。对基于（MPC）的绑定接触，如果存在间隙，在搜索方向可使用弹球区以检测间隙外的接触，如图 4–1 所示，（MPC）算法产生完全传热。对包含壳面或者实体边的接触，只能设置为绑定或不分离类型。包含壳面接触，只允许使用（MPC）算法的绑定接触行为。电焊为连接的壳装配体在离散点处传热提供了一种方法，如图 4–2 所示。

注：MPC 是 Multi Point Constraint 的缩写，是 ANSYS 接触设置中的多节点探测约束，这种约束可减少两个几何中接触约束探测点，但必须在接触部位进行网格局部细化。

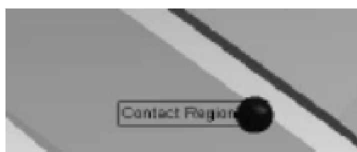


图 4-1　接触弹球区域

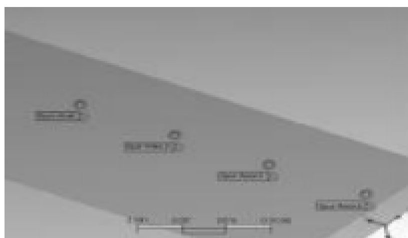


图 4-2　电焊接触

3. 接触温差

默认时，在装配体的零件间会定义一个高的接触导热系数 T_{CC}，两个零件间的热流量由接触热通量 q 定义为：

$$q = T_{CC}(T_t - T_c) \tag{4-1}$$

式中，T_c 是位于接触法向上某接触"节点"的温度，T_t 是相应的目标"节点"的温度。

默认时，T_{CC} 根据设定的接触模型中的最大热传导系数 $\lambda_{\max}$ 和装配体总体外边界对角线 Diag，被设为一个相对较"高"的值，即 $T_{CC} = \lambda_{\max} \times 10000 / \text{Diag}$，这最终提供了零件间完全的传热。

理想的零件间接触传热系数假定在接触界面上没有温度降低。接触热阻使接触的两个表面在穿过界面上有温度降低，如图 4-3 所示，这种温差是由两表面间的不良接触产生的，由此产生有限热传导，产生影响的因素包括表面的平面度、表面磨光、氧化物、残存流体、接触压力、表面温度、导热脂的使用等。

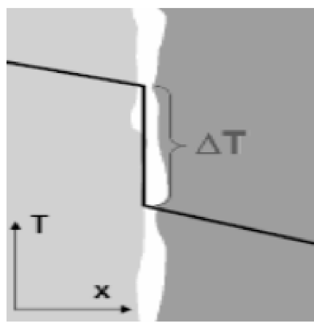


图 4-3　接触温差

4. 分析设置

对于简单线性行为无须设置，但对于复杂分析则需要设置一些控制选项，以达到加快或者满足收敛的要求，分析设置命令及含义见表 4-3。

（1）步长控制（Step Controls）

非线性热分析时，步长控制用于控制时间步长，步长控制也用于创建多个载荷步。

（2）求解器控制（Solver Controls）

求解器控制中有直接（Direct）和迭代（Iterative）两种求解器可以使用，求解器是自动选取的。求解器类型（Solver Type）下设置默认选项，直接求解器（Direct）在包含薄面和细长体的模型中是有用的作为强有力的求解器，它可以处理任何情况。迭代求解器（Iterative）在处理体积大的模型时十分有效，但它对梁和壳来说不是很有效。

（3）非线性控制（Nonlinear Controls）

非线性控制可以修改收敛准则和其他的一些求解控制选项。只要运算满足收敛判断，程序就认为收敛。收敛判据可以基于温度，也可以基于热流率，或者二者都有。

表 4-3　分析设置命令说明

命　令		分析设置命令说明
Details of "Analysis Settings"		
Step Controls		步长控制
Number Of Steps	1.	时步数：1（默认）
Current Step Number	1.	当前时步：1（默认）
Step End Time	1. s	时步结束时间：1s（默认）
Auto Time Stepping	Program Controlled	自动时间步设置：程序控制（默认）
Solver Controls		求解控制
Solver Type	Program Controlled	求解类型：程序控制（默认）
Nonlinear Controls		非线性控制
Heat Convergence	Program Controlled	热收敛准则：程序控制（默认）
Temperature Convergence	Program Controlled	温度收敛准则：程序控制（默认）
Line Search	Program Controlled	线性搜索：程序控制（默认）
Output Controls		输出控制：
Calculate Thermal Flux	Yes	是否计算热通量：是（默认）
Calculate Results At	All Time Points	计算结果输出：在所有时间点（默认）
Analysis Data Management		分析数据管理
Solver Files Directory	C:\Documents and ...	求解器工作路径：
Future Analysis	None	后续分析类型：无（默认）
Scratch Solver Files Directory		获取求解文件：
Save ANSYS db	No	是否保存 ANSYS DB 文件：否（默认）
Delete Unneeded Files	Yes	是否删除不需要的文件：是（默认）
Nonlinear Solution	No	是否非线性求解：否（默认）
Solver Units	Active System	求解器单位：当前活动系统（默认）
Solver Unit System	mks	求解器单位系统：nks（默认）
Visibility		可视化
[A] Convection (Convection Coefficient)	Display	对流（对流换热系数）：显示
[B] Temperature	Display	温度：显示

在实际定义时，需要说明一个典型值（Value）和收敛容差（Tolerance），程序将二者的乘积值视为收敛判据。例如，说明温度的典型值为 500，容差为 0.001，那么收敛判据则为 500×0.001=0.5℃。对于温度，ANSYS 将连续两次平衡迭代之间节点上温度的变化量与收敛准则进行比较来判断是否收敛。如果在某两次平衡迭代间，每个节点的温度变化都小于 0.5℃，那么当前求解的问题就达到收敛效果。

对于热流率，ANSYS 比较不平衡载荷矢量和收敛准则，不平衡载荷矢量表示所施加的热流与内部计算热流率之间的差值。ANSYS（Value）值由默认值确定，收敛容差为 0.5%。

线性搜索（Line Search）选项可以使 ANSYS 用 New-Raphson（牛顿-拉夫逊）方法进行线性搜索。

（4）输出控制（Output Controls）

输出控制允许在结果后处理中得到需要的时间点结果，尤其是在非线性分析中，设置关键时刻的结果是很重要的。

（5）分析数据管理（Analysis Data Management）

分析数据管理保存稳态热分析结果文件用于其他的分析系统，如稳态热分析的结果作为瞬态分析的初始条件，因此可以将稳态热分析结果随后的分析（Future Analysis）设置为瞬态热分析（Transient Thermal），用于后面的瞬态分析。

5. 载荷与边界条件

载荷与边界条件可以直接在实体模型（点、线、面、体）上施加，可以是单值，也可以用表格或函数的方式来定义复杂的热载荷，ANSYS Workbench 平台热分析的载荷与边界条件如图 4–4 所示。

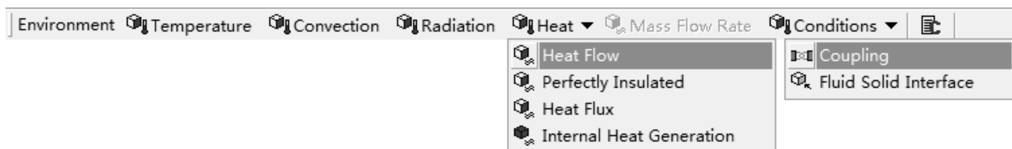


图 4–4 热分析载荷

（1）恒定温度（Temperature）

通常作为自由度约束施加于温度已知的边界上。对于 3D 分析和 2D 平面应力及轴对称分析，如图 4–5 所示。

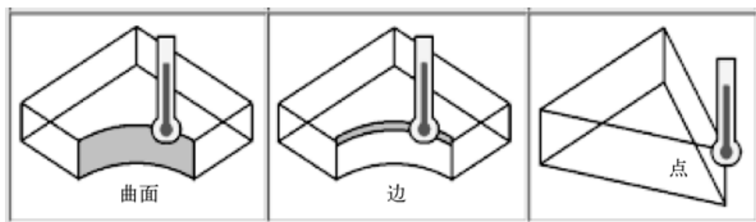


图 4–5 恒定温度

（2）对流（Convection）

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_s - T_f) \tag{4–2}$$

用于 3D 分析和 2D 平面应力及轴对称分析，对流通过与流体接触面发生对流换热，只能施加到表面上，对流使“环境温度”与表面温度相关。对流热通量 q 与对流换热系数 h、表面积 A、表面温度 T_f 有关，如图 4–6 所示，对流换热系数 h 可以是常量或温度的变量，即与温度相关的对流条件。

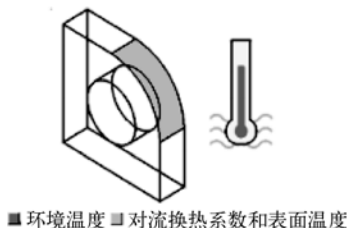


图 4–6 对流

首先确定 $h(T)$ 使用什么样的温度，温度可以是：

- 平均膜温度（Average Film Temperature）：$T = \frac{1}{2}(T_s + T_f)$。
- 表面温度（Surface Temperature）：$T = T_s$。

- 环境温度（Bulk Temperature）：$T = T_f$。
- 表面与环境温度差（Difference of Surface and Bulk Temperature）：$T = T_s - T_f$。

在对流详细信息窗口中选择（Film Coefficient）→Tabular（Temperature）选项，在出现的表数据中输入温度和对流换热系数，如图 4-7 所示。

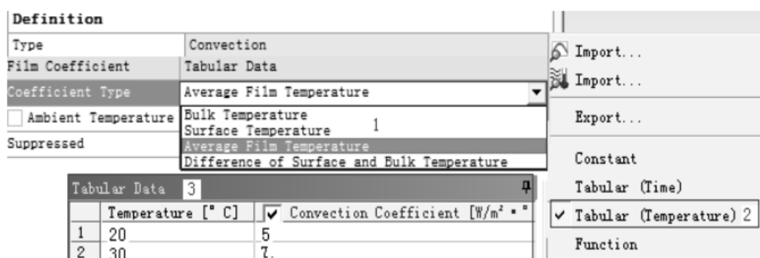


图 4-7　输入变量对流换热系数

（3）辐射（Radiation）

施加到 3D 表面或者 2D 模型的边，仅提供向周围环境的辐射设置，不包括两个或者多个面之间的相互辐射（需要通过在 Workbench 下编程实现），形状系数假定为 $F_{12}=1$，于是有：

$$Q = \varepsilon_1 A_1 \sigma F_{12}(T_1^4 - T_2^4) \tag{4-3}$$

式中，σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，并且自动由采用的单位制决定，辐射属性中设置热辐射效率（黑度）ε_1 和环境温度 T_2。

（4）热流率（Heat Flow）

指单位时间内通过传热面的热量。整个换热器的传热速率表征换热器的生产能力，单位为 W。热流率作为节点集中载荷，可以施加点、边、面上，线体模型通常不能直接施加对流和热流的密度载荷。如果输入的数值为正，表示热流流入节点，即获得热量，如图 4-8 所示。

注：如果在实体单元的某一个节点上施加热流率，则此节点周围的单元应该密一些，特别是与该节点相连的单元的导热系数差别很大时，尤其要注意，不然可能会得到异常的温度值。因此，只要可能，都应该使用热生成或热流密度边界条件，这些载荷即使是在网格较为粗糙的时候也能得到较好的结果。

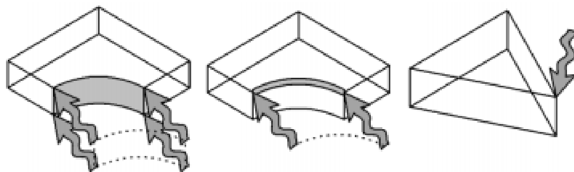


图 4-8　热流率

（5）完全绝热（Perfectly Insulated）

用于 3D 分析和 2D 平面应力及轴对称分析，完全绝热条件施加到表面上，可认为是加

载热流率，在热分析中，当不施加任何载荷时，它实际上就是自然产生的边界条件。

通常情况下，不需要给面上施加完全绝热条件，因为这是一个规则表面的默认状态。因此，这种加载通常用于删除某一个特定面上的载荷。例如，可以先在所有面上施加热通量或对流，然后用完全绝热条件有选择性地“删除”某些面上的载荷（比如与其他零件相接触的面等），此时要方便简单得多。

（6）热流密度（Heat Flux）

指单位时间通过单位传热面积所传递的热量，即 $q=\dfrac{Q}{A}$。在一定的热流量下，q 越大，所需的传热面积越小。因此，热通量是反映传热强度的指标，又称为热流密度，单位为 W/m²，如图 4-9 所示。

- 内部热生成（Internal Heat Generation）：用于 3D 分析和 2D 平面应力及轴对称分析，内部热生成作为体载荷只能施加到体上，可以模拟单元内的热生成，比如化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率 W/m³。正的热负荷值将会向系统中添加能量，而且如果有多个载荷同时存在，其效果是累加的。
- CFD 导入温度（CFD Imported Temperature）：通过与流体耦合计算时将流体中壁面的温度作用到结构上。
- CFD 导入对流（CFD Imported Convection）：通过与流体耦合计算时将流体中壁面的对流换热系数作用到结构上。

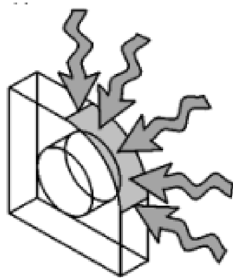


图 4-9　热通量

4.2　ANSYS Mechanical 17.0 后处理

Workbench 平台的后处理包括以下几部分内容：查看结果、显示结果（Scope Results）、输出结果、坐标系和方向解、结果组合（Solution Combinations）、应力奇异（Stress Singularities）、误差估计和收敛状况等。

4.2.1 查看结果

当选择一个结果选项时，文本工具框会显示该结果所要表达的内容，如图 4-10 所示。



图 4-10　结果选项卡

缩放比例：对于结构分析（静态、模态、屈曲分析等），模型的变形情况将发生变化，默认状态下，为了更清楚地看到结构的变化，比例系数被自动放大，同时用户可以改变为非变形或者实际变形情况，按照图 4-11 所示设置变形因子；同时也可以自己输入



变形因子，如图 4-12 所示。

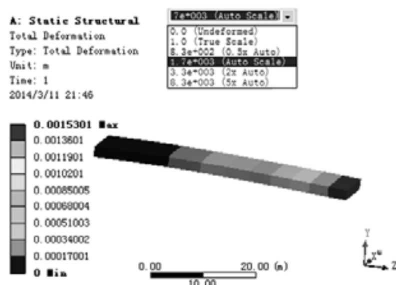


图 4-11　默认比例因子

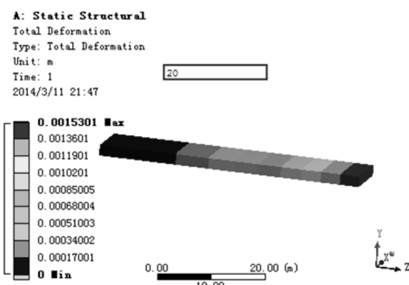


图 4-12　输入比例因子

显示方式：几何按钮控制云图显示方式，共有四种可供选择的选项：

- Exterior：默认的显示方式并且是最常使用的方式，如图 4-13 所示。
- IsoSurface：对于显示相同的值域是非常有用的，如图 4-14 所示。

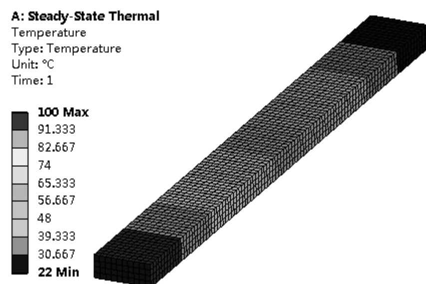


图 4-13　Exterior 方式

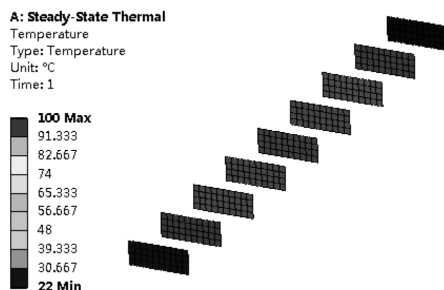


图 4-14　IsoSurface 方式

- Capped IsoSurface：指删除了模型的一部分之后的显示结果，删除的部分是可变的，高于或者低于某个指定值的部分被删除，如图 4-15 和图 4-16 所示。
- Slice Planes：允许用户去真实地切模型，需要先创建一个界面然后显示剩余部分的云图，如图 4-17 所示。

注：对于稳态热分析该功能不可用。

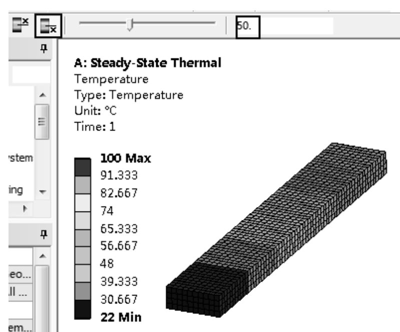


图 4-15　Capped IsoSurface 方式（1）

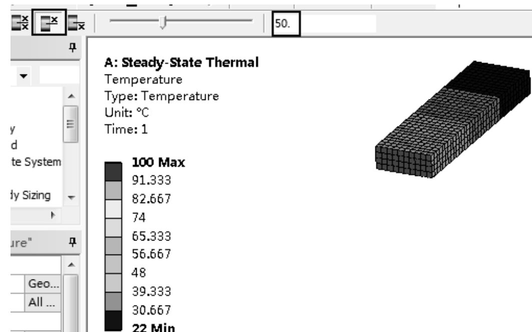


图 4-16　Capped IsoSurface 方式（2）

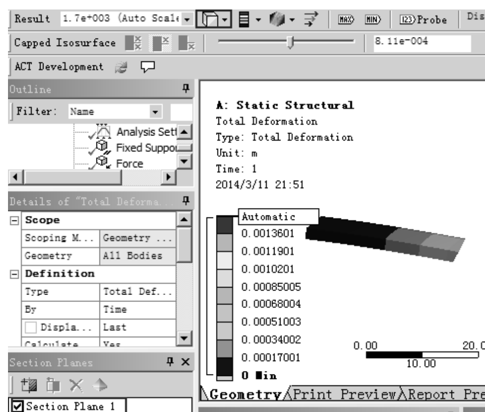


图 4-17 Slice Planes 方式（结构分析中）

色条设置：Contour 按钮可以控制模型的显示云图方式。

- Smooth Contour：光滑显示云图，颜色变化过渡变焦光滑，如图 4-18 所示。
- Contour Bands：云图显示有明显的色带区域，如图 4-19 所示。

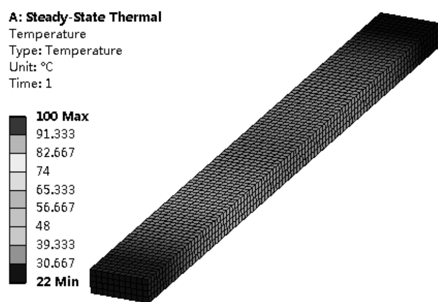


图 4-18 Smooth Contour 方式

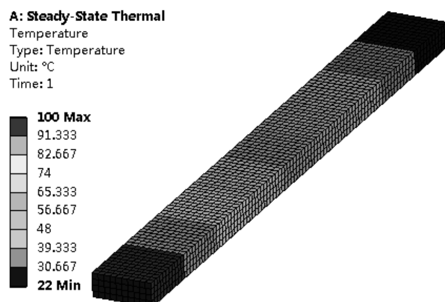


图 4-19 Contour Bands 方式

- Isolines：以模型等值线方式显示，如图 4-20 所示。
- Solid Fill：不在模型上显示云图，如图 4-21 所示。

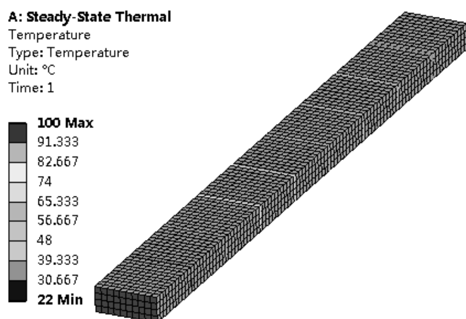


图 4-20 Isolines 方式

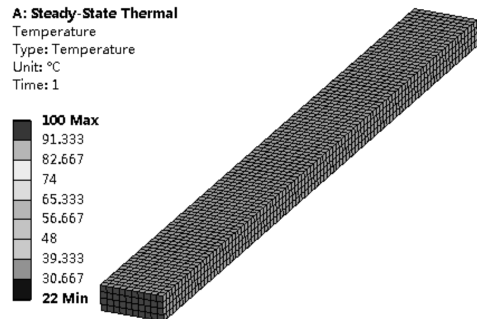


图 4-21 Solid Fill 方式

外形显示：Edge 按钮允许用户显示未变形的模型或者划分网格的模型。

- No WireFrame：不显示几何轮廓线，如图 4-22 所示。

● Show Underformed WireFrame：显示未变形轮廓，如图 4-23 所示。

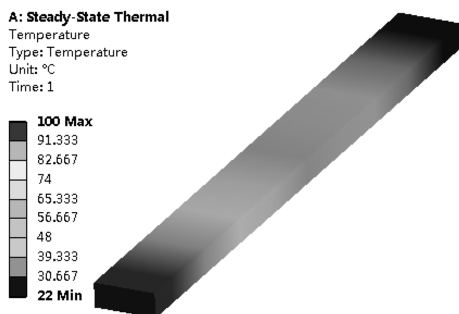


图 4-22 No WireFrame 方式

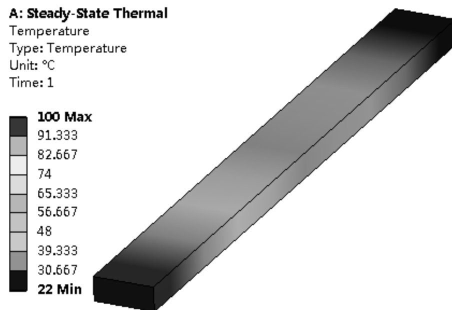


图 4-23 Show Underformed WireFrame 方式

● Show Underformed Model：显示未变形的模型，如图 4-24 所示。

● Show Element：显示单元，如图 4-25 所示。

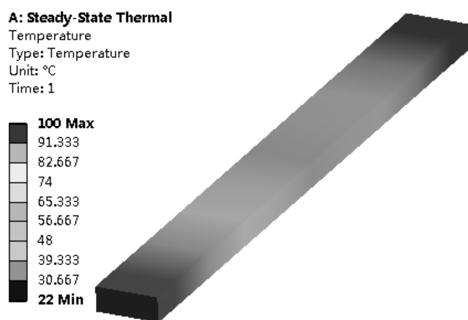


图 4-24 Show Underformed Model 方式

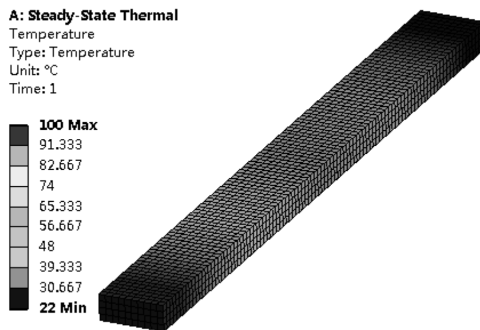


图 4-25 Show Element 方式

最大值、最小值与探测工具：单击相应按钮后，在图形中将显示最大值、最小值和刺探位置的数值。

最大值按钮：单击工具栏中的图标，将在后处理显示最大值，如图 4-26 所示，显示当前分析的最大温度值及位置。

最小值按钮：单击工具栏中的图标，将在后处理显示最小值，如图 4-27 所示，显示当前分析的最小温度值及位置。

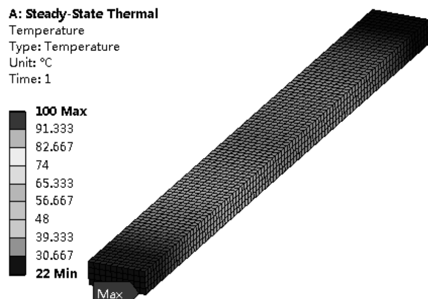


图 4-26 显示最大值

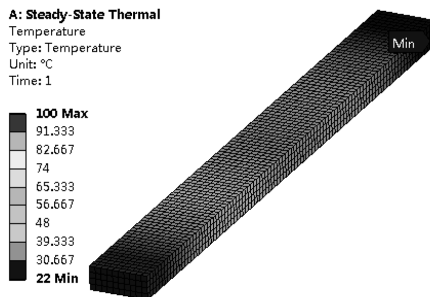


图 4-27 显示最小值

探测工具按钮：单击工具栏中的 Probe 图标，在后处理窗口中的几何上用鼠标左键单击任意一点，此时将显示当前位置的温度值，如图 4-28 和图 4-29 所示。

注意：以上三种类型的按钮可以组合使用，以达到不同的效果，请读者自己完成，这里不再赘述。

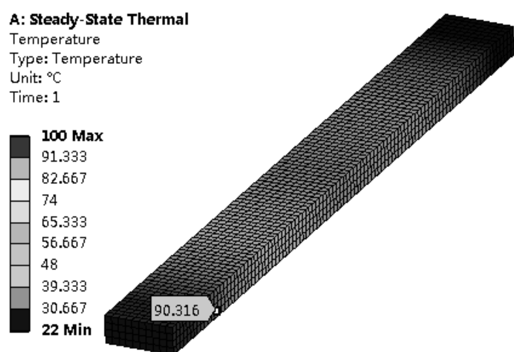


图 4-28 探测显示（1）

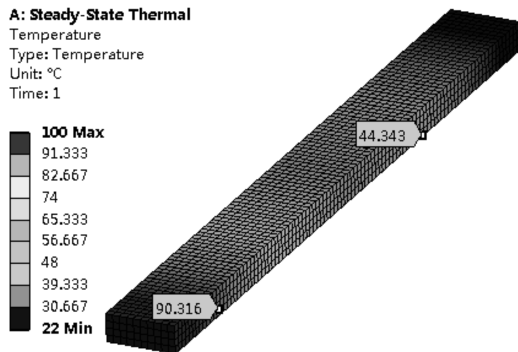


图 4-29 探测显示（2）

4.2.2 结果显示

在后处理中，读者可以指定输出的结果，以稳态热计算为例（见图 4-30），后处理能得到温度分布、总的热流密度、各个方向的热流密度、节点温度探测、节点热流探测等。

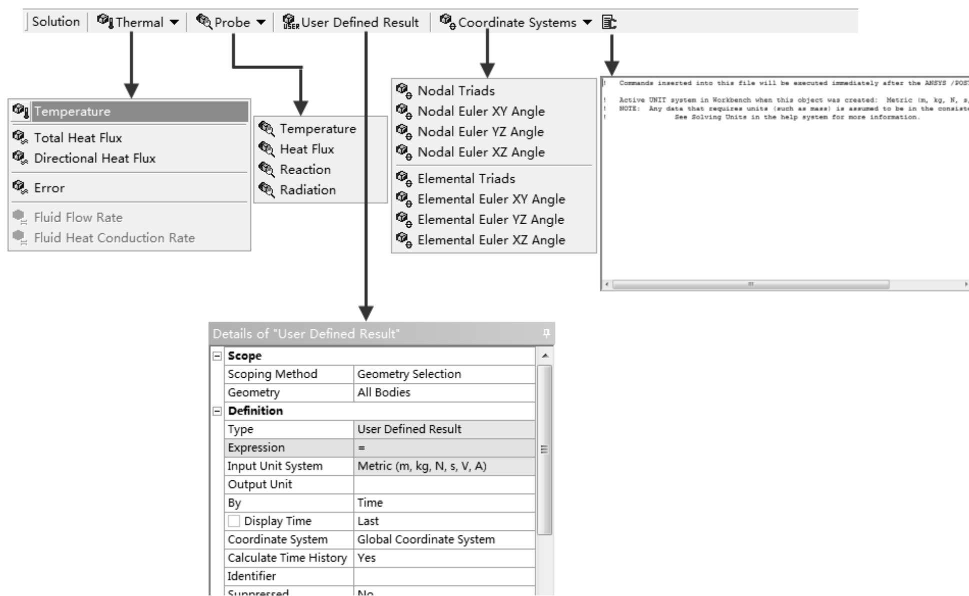


图 4-30 后处理（1）

读者还可以通过选择 User Defined Result（用户自定义结果）命令，然后在 Details of “User Defined Result”设置对话框中的 Expression 栏中输入需要关注结果的表达式，以输出

自定义的结果。

读者通过单击工具栏中的 Worksheet 按钮，将在绘图窗口中显示出当前分析可用的、软件已经自定义好的后处理结果，如图 4−31 所示。

Solve ▾ ?/ Show Errors Worksheet

Solution Quantities and Result Summary

List Available Solution Quantities

List Result Summary

Type	Data Type	Data Style	Component	Expression	Output Unit
TEMP	Nodal	Scalar		TEMP	Temperature
TF	Element Nodal	Scalar	X	TFX	Heat Flux
TF	Element Nodal	Scalar	Y	TFY	Heat Flux
TF	Element Nodal	Scalar	Z	TFZ	Heat Flux
TF	Element Nodal	Scalar	SUM	TFSUM	Heat Flux
TF	Element Nodal	Vector	VECTORS	TFVECTORS	Heat Flux
VOLUME	Elemental	Scalar		VOLUME	Volume
ENERGY	Elemental	Scalar	POTENTIAL	ENERGYPOTE...	Energy
ENERGY	Elemental	Scalar	KINETIC	ENERGYKINE...	Energy
STEN	Elemental	Scalar		STEN	Energy
TERR	Elemental	Scalar		TERR	No Units
HEAT	Nodal	Scalar		HEAT	Heat Rate
NDIR	Nodal	Scalar	XY	NDIRXY	Angle
NDIR	Nodal	Scalar	YZ	NDIRYZ	Angle
NDIR	Nodal	Scalar	XZ	NDIRXZ	Angle
NDIR	Nodal	Euler Angles	VECTORS	NDIRVECTORS	Angle
EDIR	Elemental	Scalar	XY	EDIRXY	Angle
EDIR	Elemental	Scalar	YZ	EDIRYZ	Angle
EDIR	Elemental	Scalar	XZ	EDIRXZ	Angle
EDIR	Elemental	Euler Angles	VECTORS	EDIRVECTORS	Angle
LOC	Nodal	Scalar	X	LOCX	Displacement
LOC	Nodal	Scalar	Y	LOCY	Displacement
LOC	Nodal	Scalar	Z	LOCZ	Displacement
LAYNUMBER	Elemental	Scalar		LAYNUMBER	No Units
PNUM	Elemental	Scalar	TYPE	PNUMTYPE	No Units
PNUM	Elemental	Scalar	REAL	PNUMREAL	No Units
PNUM	Elemental	Scalar	MAT	PNUMMAT	No Units
PNUM	Elemental	Scalar	SEC	PNUMSEC	No Units
PNUM	Elemental	Scalar	ESYS	PNUMESYS	No Units
PNUM	Elemental	Scalar	ELEM	PNUMELEM	No Units
MESH_	Elemental	Scalar	ELEMENT_Q...	MESH_ELEME...	No Units
MESH_	Elemental	Scalar	ASPECT_RATIO	MESH_ASPEC...	No Units
MESH_	Elemental	Scalar	JACOBIAN_R...	MESH_JACOB...	No Units
MESH_	Elemental	Scalar	WARPING_FA...	MESH_WARPI...	No Units
MESH_	Elemental	Scalar	PARALLEL_DE...	MESH_PARAL...	No Units
MESH_	Elemental	Scalar	MAXIMUM_C...	MESH_MAXI...	No Units

图 4−31　后处理（2）

4.2.3 温度结果显示

在 Workbench Mechanical 的温度仿真计算结果中，可以显示模型与温度相关的结果，主要包括 Temperature、Total Heat Flux、Directional Heat Flux 及 Error，如图 4−32 所示。

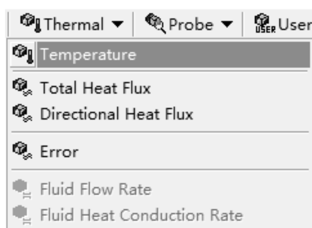


图 4−32　热分析选项

1）Temperature（温度分布）：温度分布是一个标量，它由下式决定：

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_y^2}$$

2）Total Heat Flux（总热流密度）：结构中总的热流密度分布。

3）Directional Heat Flux（各方向热流密度）：Workbench 中可以给出各方向的热流密度矢量图，表明热流方向，如图 4-33 所示。

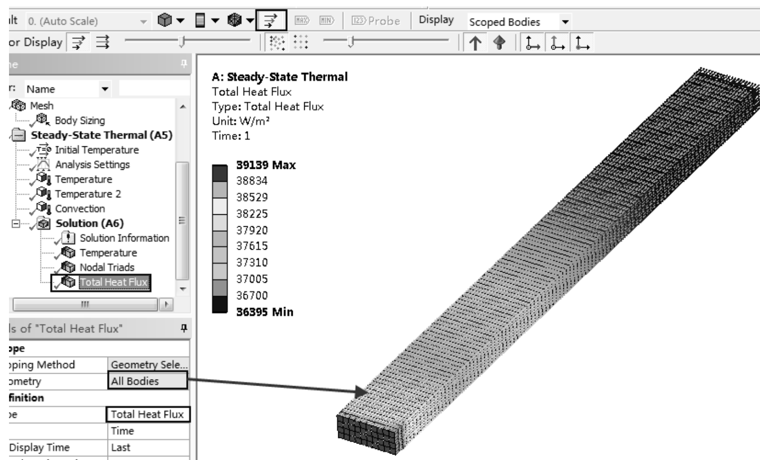


图 4-33 热流密度矢量图

4）单击工具栏中相应按钮，在后处理中将以不同的样式显示出热流密度矢量图，图 4-34 所示为显示与组合时的后处理结果，通过移动滑条可以调节矢量箭头的疏密程度。

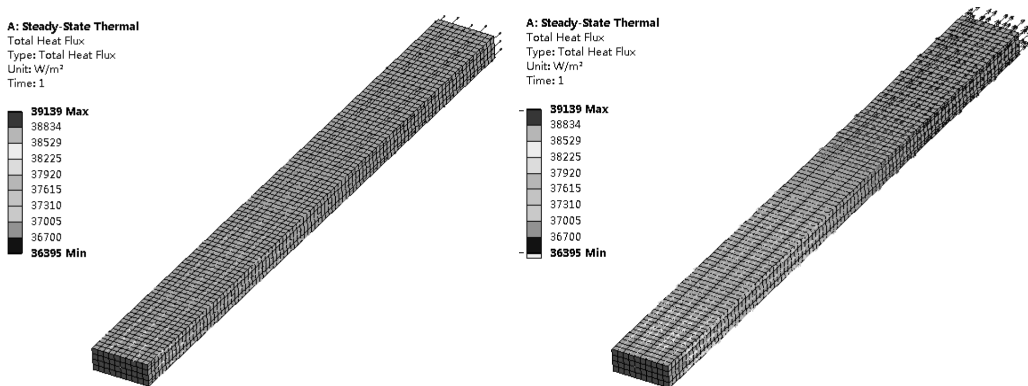


图 4-34 调节显示不同矢量图

4.2.4 用户自定义输出结果

在 Workbench Mechanical 平台的工具栏中单击 User Defined Result 按钮，将出现图 4-35 所示的 Detuil of“User Defined Result”设置面板，在这里可以根据用户所关注的结果进行公式编辑。

在 Expression 中输入“0.25*TEMP”，其中 TEMP 是软件默认的关键字，参看图 4-31 中的 Expression 列，如图 4-36 所示。

在后处理中，读者可以通过右键选择 Solution 命令，在弹出的图 4-37 所示的快捷菜单中依次选择相关结果进行输出。

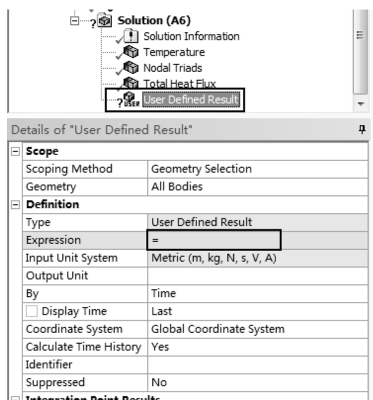


图 4-35　Detuil of“User Defined Result”设置面板

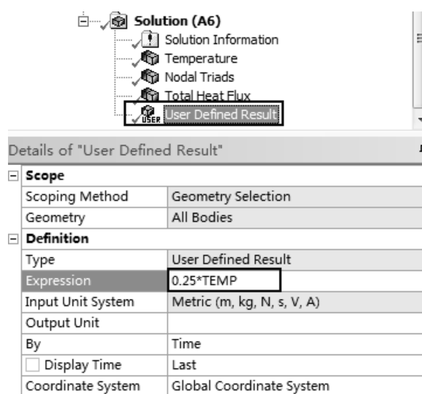


图 4-36　公式编辑

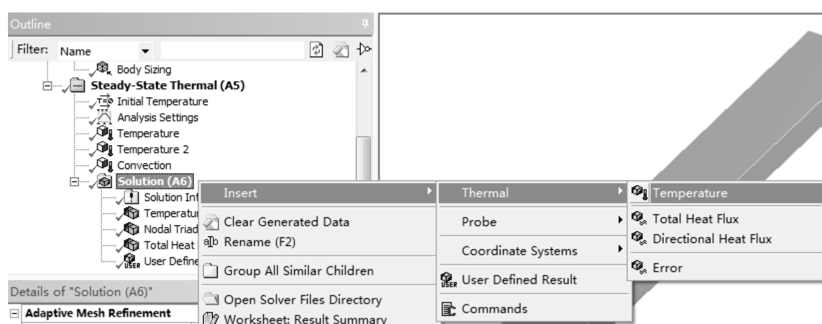


图 4-37　后处理

4.2.5　后处理结果（2）

在 Workbench Mechanical 中单击 Worksheet 按钮后将显示图 4-31 所示的可执行的后处理操作，下面简单介绍一下如何使用。如图 4-38 所示，右键选中所关心的后处理结果，如 HEAT，在弹出的快捷菜单中选择 Create User Defined Result 命令，然后计算，此时将显示图 4-39 所示的结果。

Type	Data Type	Data Style	Component	Expression	Output Unit
TEMP	Nodal	Scalar		TEMP	Temperature
TF	Element Nodal	Scalar	X	TFX	Heat Flux
TF	Element Nodal	Scalar	Y	TFY	Heat Flux
TF	Element Nodal	Scalar	Z	TFZ	Heat Flux
TF	Element Nodal	Scalar	SUM	TFSUM	Heat Flux
TF	Element Nodal	Vector	VECTORS	TFVECTORS	Heat Flux
VOLUME	Elemental	Scalar		VOLUME	Volume
ENERGY	Elemental	Scalar	POTENTIAL	ENERGYPOTE...	Energy
ENERGY	Elemental	Scalar	KINETIC	ENERGYKINE...	Energy
STEN	Elemental	Scalar		STEN	Energy
TERR	Elemental	Scalar		TERR	No Units
HEAT	Nodal	Scalar		HEAT	Heat Rate
NDIR	Nodal	Create User Defined Result		NDIRXY	Angle
NDIR	Nodal	Scalar	YZ	NDIRYZ	Angle
NDIR	Nodal	Scalar	XZ	NDIRXZ	Angle
NDIR	Nodal	Euler Angles	VECTORS	NDIRVECTORS	Angle
EDIR	Elemental	Scalar	XY	EDIRXY	Angle
EDIR	Elemental	Scalar	YZ	EDIRYZ	Angle
EDIR	Elemental	Scalar	XZ	EDIRXZ	Angle
EDIR	Elemental	Euler Angles	VECTORS	EDIRVECTORS	Angle
LOC	Nodal	Scalar	X	LOCX	Displacement
LOC	Nodal	Scalar	Y	LOCY	Displacement

图 4-38　快捷菜单

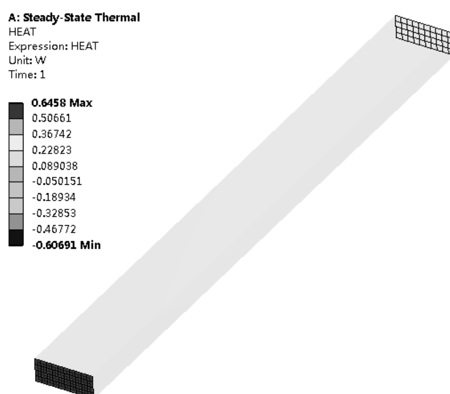


图 4-39　结果

4.3 案例分析

前面一节介绍了一般后处理的常用方法及步骤，下面通过一个简单的案例讲解一下前后处理的操作方法，以加深读者对热分析流程的理解。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中热分析的建模方法及求解过程，同时掌握热分析方法。

模型文件	网盘\Chapter4\part.stp
结果文件	网盘\Chapter4\part.wbpj

4.3.1 问题描述

图 4-40 所示的某铝合金模型，请用 ANSYS Workbench 分析工件一端为 200℃、另一端为常温 22℃时，其温度分布，所有表面的对流换热系数为 6.3。

4.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17.0 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 4-41 所示。

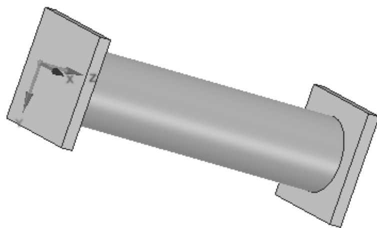


图 4-40　铝合金模型

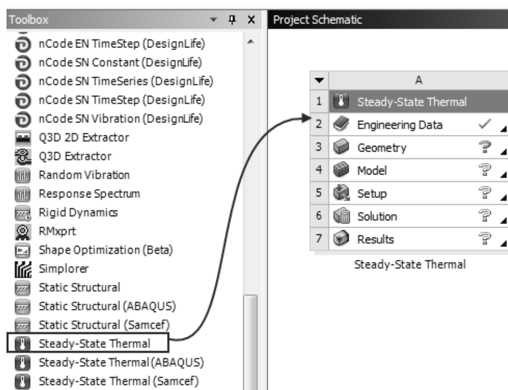


图 4-41　创建分析项目 A

4.3.3 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 4-42 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 Part.stp 几何体文件，如图 4-43 所示，此时 A3：Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

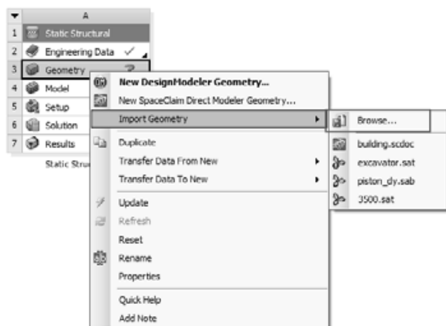


图 4-42　导入几何体

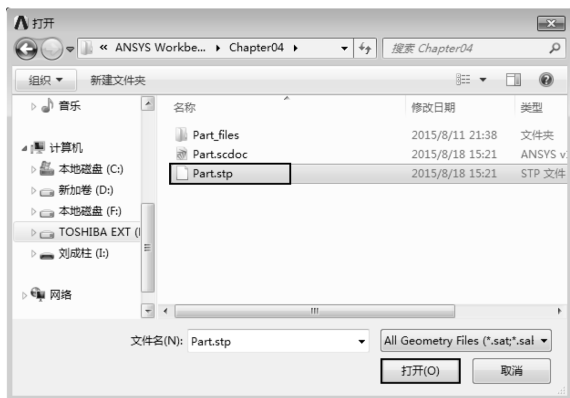


图 4-43　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2：Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，选择单位为 mm，单击 OK 按钮，此时设计树中的 Import1 前显示⚡，表示需要生成几何体，图形窗口中没有图形显示，如图 4-44 所示。

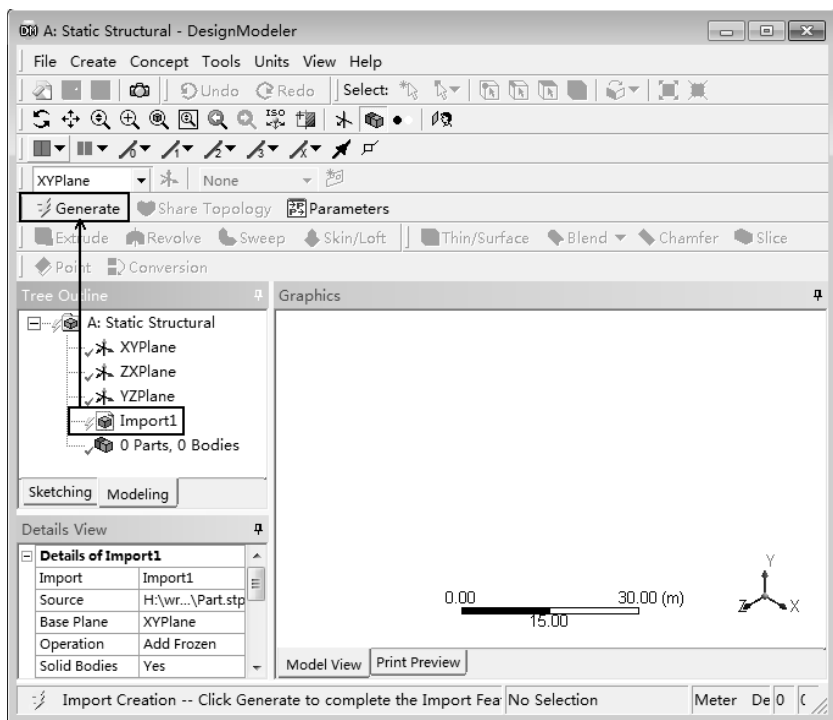


图 4-44　生成前的 DesignModeler 界面

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 4-45 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无须进行操作。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

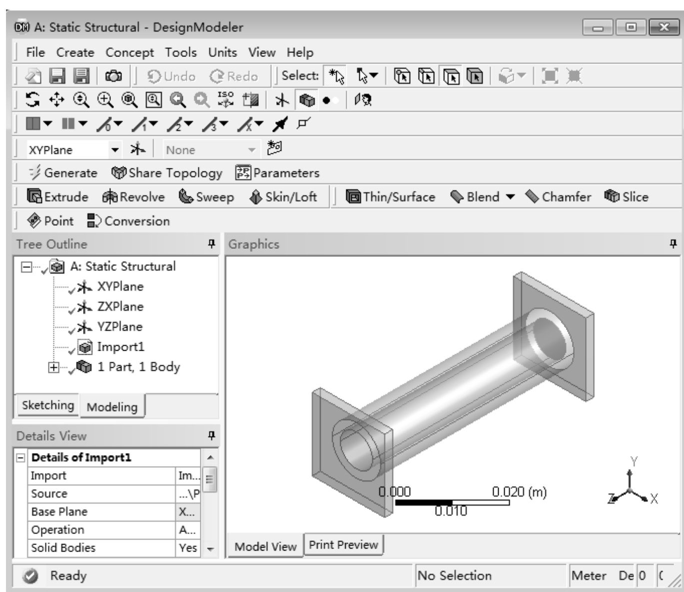


图 4-45 生成后的 DesignModeler 界面

4.3.4 添加材料库

Step1: 双击项目 A 中的 A2：Engineering Data 项，进入图 4-46 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

Step2: 在界面的空白处单击鼠标右键，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），此时的界面会变为如图 4-47 所示。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，代之以 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials。

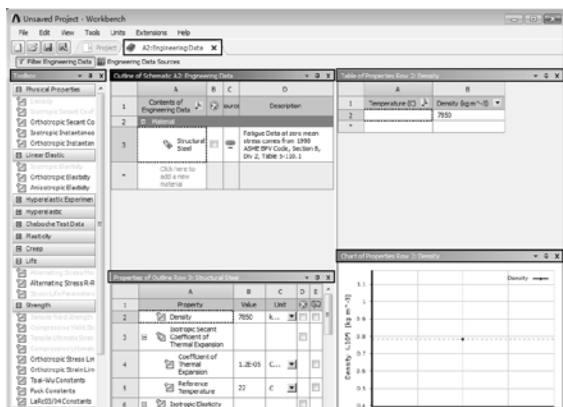


图 4-46 材料参数设置界面（1）

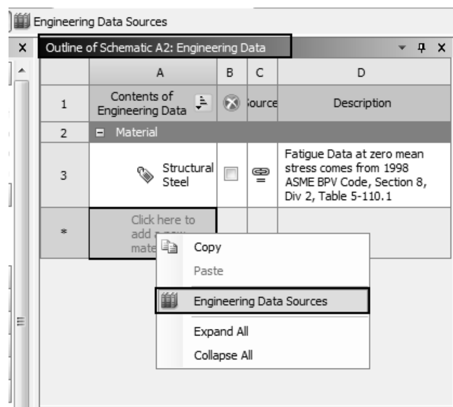


图 4-47 材料参数设置界面（2）

Step3: 在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials，然后单击 Outline of General Materials 表中 A4 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B4 栏的 （添加），此时在 C4 栏中会显示 （使用中的）标识，如图 4-48 所示，标识材料添加成功。

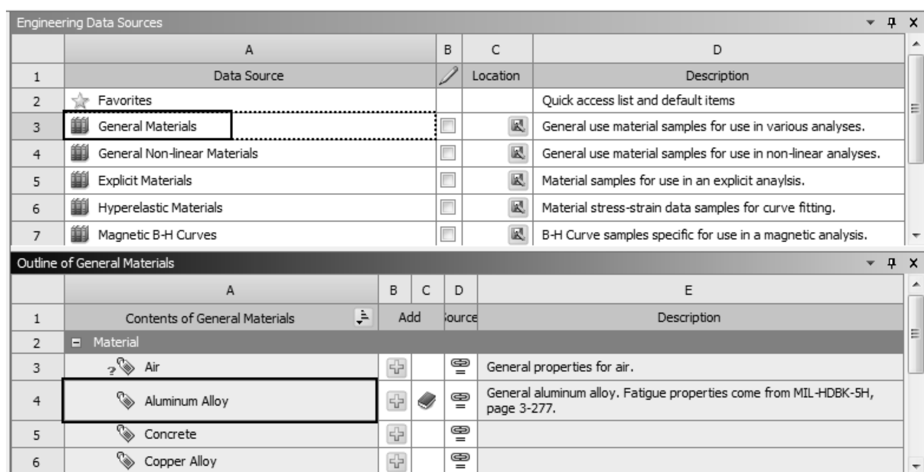


图 4-48 添加材料

Step4：同 Step2，在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 4:Aluminum Alloy 表中可以修改材料的特性，如图 4-49 所示，本实例采用的是默认值。

提示：用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

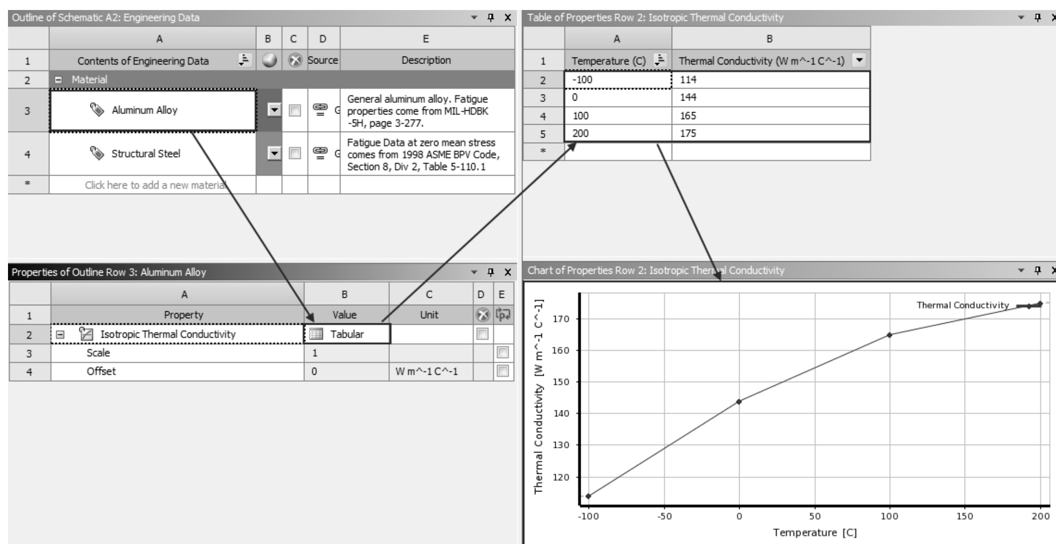


图 4-49 材料属性窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

4.3.5 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 项，进入图 4-50 所示的 Mechanical 界面，在该界面下进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

提示：ANSYS Workbench 17.0 程序默认的材料为 Structural Steel。

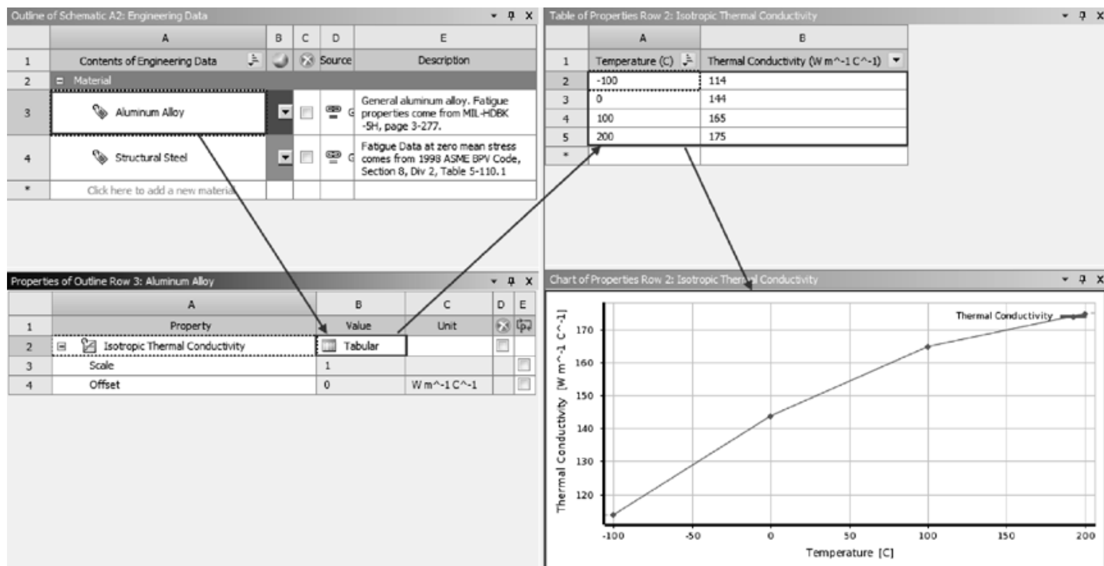


图 4-50　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 1，此时即可在 Details of“1”（参数列表）中给模型添加材料，如图 4-51 所示。

Step3：单击参数列表中 Material 下 Assignment 区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminum Alloy，选择即可将其添加到模型中。如图 4-52 所示，表示材料已经添加成功。

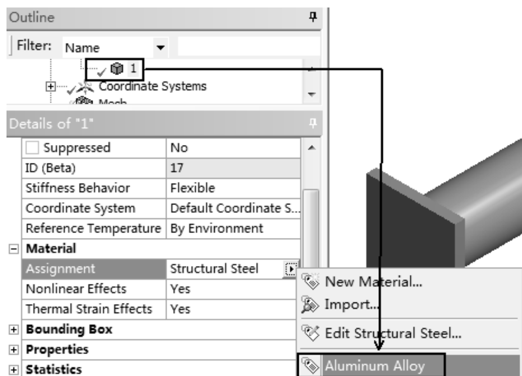


图 4-51　变更材料

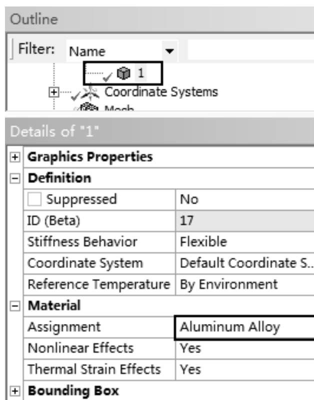


图 4-52　修改材料后的分析树

4.3.6 划分网格

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，本例中将 Sizing 下的 Element Size 设置为 5.e−004m，其余采用默认设置，如图 4−53 所示。

Step2： 在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 4−54 所示。

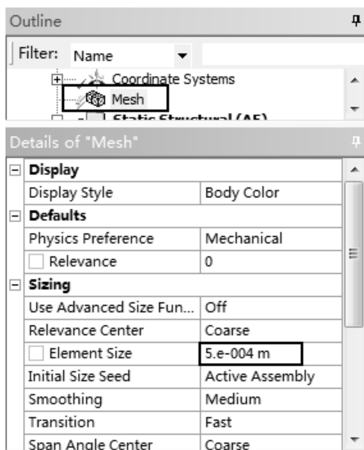


图 4−53　生成网格

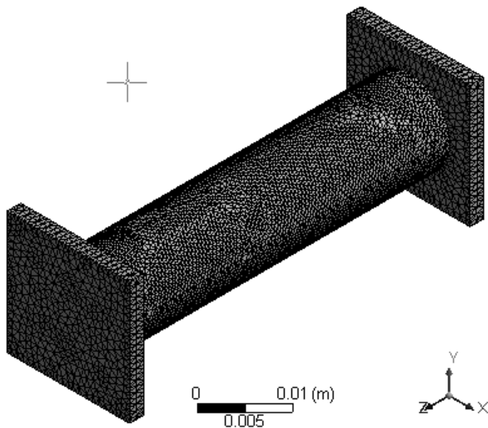


图 4−54　网格效果

4.3.7 施加载荷与约束

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时出现图 4−55 所示的 Environment 工具栏。

Step2： 选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 4−56 所示。

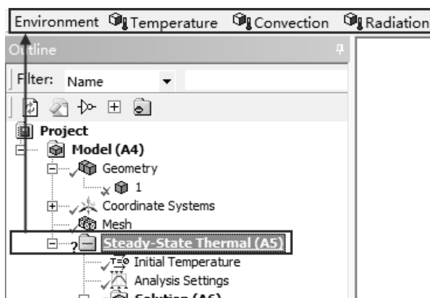


图 4−55　Environment 工具栏

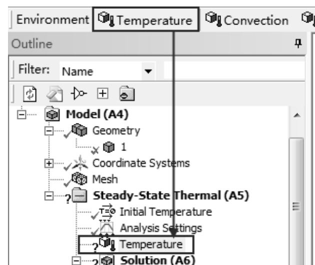


图 4−56　添加固定约束

Step3： 选中 Temperature，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Temperature（A5）”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Magnitude 栏中输入 200℃，如图 4−57 所示。

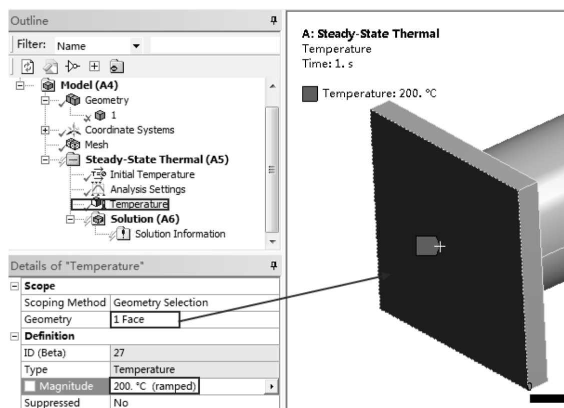


图 4–57 施加温度约束

Step4：同 Step2，选择 Environment 工具栏中的 Temperature 命令，此时在分析树中会出现 Temperature2 选项，将温度设置为 22℃，如图 4–58 所示。

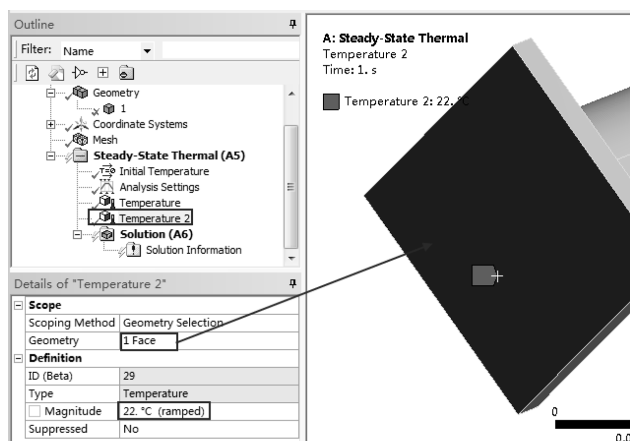


图 4–58 添加温度

Step5：添加一个对流换热边界条件 Convection，在 Geometry 栏中选择圆柱面；在 Film Coefficient 栏中选择输入 6.3；在 Ambient Temperature 中输入 22℃，保持其他选项默认即可，如图 4–59 所示。

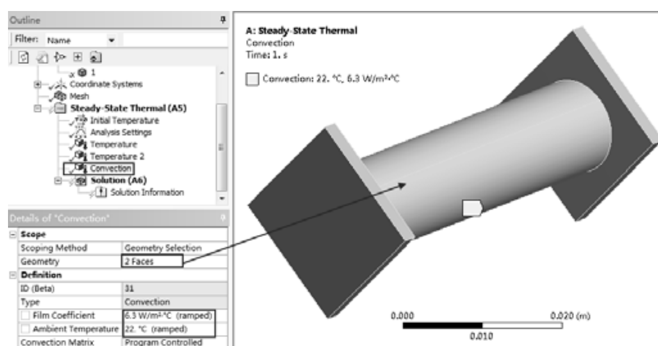


图 4–59 添加面载荷

Step6：在 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 4-60 所示。

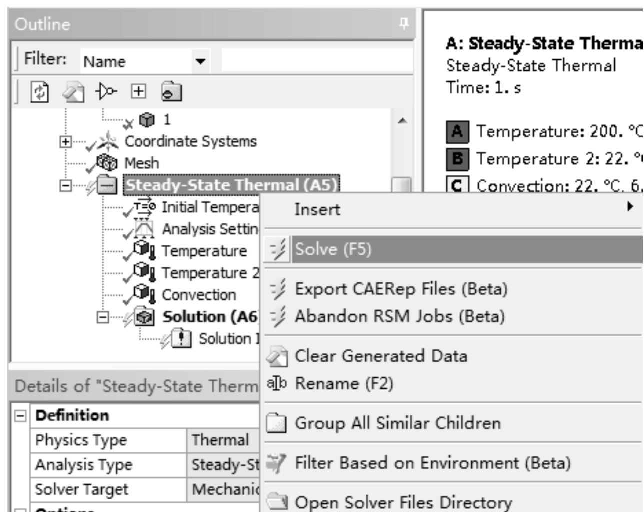


图 4-60　求解

4.3.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时出现图 4-61 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项，如图 4-62 所示。

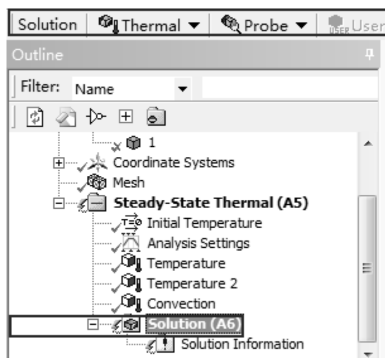


图 4-61　Solution 工具栏

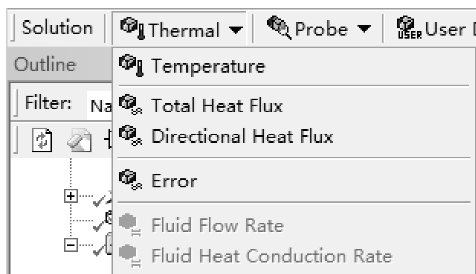


图 4-62　添加温度选项

Step3：同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Total Heat Flux（热流密度）命令，如图 4-63 所示，此时在分析树中会出现 Total Heat Flux（热流密度）选项。

Step4：在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 4-64 所示。

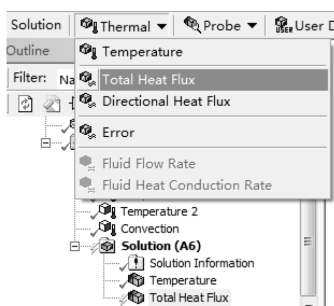


图 4-63 热流密度选项

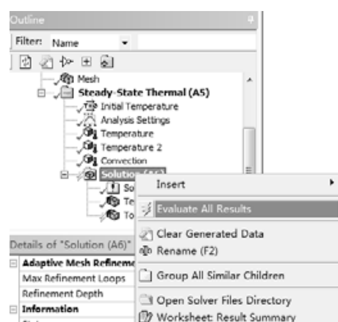


图 4-64 快捷菜单

Step5：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature 选项，此时会出现图 4-65 所示的温度分布云图。

Step6：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Heat Flux（热流密度）选项，此时会出现图 4-66 所示的应变分析云图。

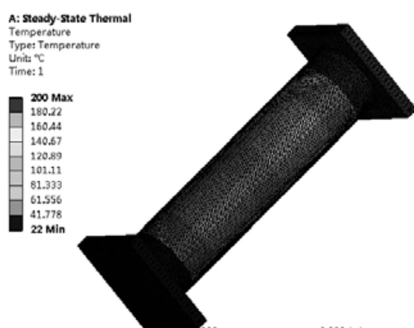


图 4-65 温度分布云图

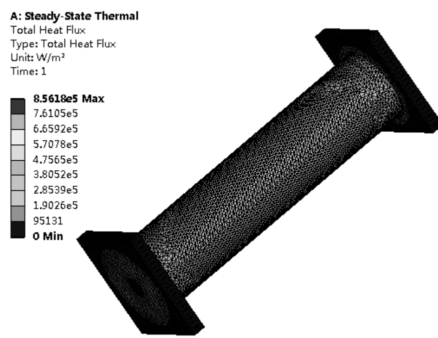


图 4-66 热流密度云图

Step7：选择工具栏 命令下的 Smooth Contours 命令，此时分别显示应力、应变及位移，如图 4-67 所示。

Step8：选择工具栏 命令下的 Isolines 命令，此时分别显示应力、应变及位移，如图 4-68 所示。

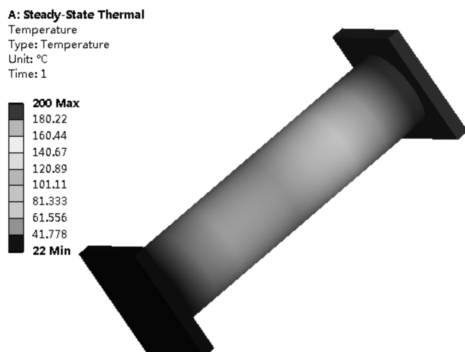


图 4-67 Smooth 云图

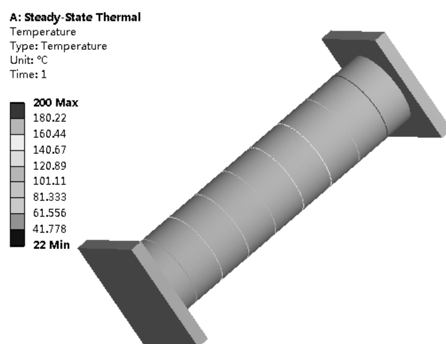


图 4-68 Isolines 云图

Step9：选择 Solution（C4）命令，选择工具栏中的 Worksheet 命令，再选择 List Result Summary 选项，此时绘图窗口中弹出图 4-69 所示的列表。

Solution Quantities and Result Summary

○ List Available Solution Quantities

◉ List Result Summary

Results	Minimum	Maximum	Uni...	Time (s)
Equivalent Stress	8.6853e+005	5.2518e+009	Pa	1.
Equivalent Elastic Strain	1.643e-005	7.8852e-002	m/m	1.
Total Deformation	0.	9.195e-003	m	1.

图 4-69　后处理列表

Step10：选择 List Available Solution Quantities 单选按钮，此时绘图窗口显示图 4-70 所示的列表。

◉ List Available Solution Quantities

○ List Result Summary

Type	Data Type	Data Style	Component	Expressior
TEMP	Nodal	Scalar		TEMP
TF	Element Nodal	Scalar	X	TFX
TF	Element Nodal	Scalar	Y	TFY
TF	Element Nodal	Scalar	Z	TFZ
TF	Element Nodal	Scalar	SUM	TFSUM
TF	Element Nodal	Vector	VECTORS	TFVECTOR
VOLUME	Elemental	Scalar		VOLUME
ENERGY	Elemental	Scalar	POTENTIAL	ENERGYP(
ENERGY	Elemental	Scalar	KINETIC	ENERGYKI
STEN	Elemental	Scalar		STEN
TERR	Elemental	Scalar		TERR
HEAT	Nodal	Scalar		HEAT
NDIR	Nodal	Scalar	XY	NDIRXY
NDIR	Nodal	Scalar	YZ	NDIRYZ
NDIR	Nodal	Scalar	XZ	NDIRXZ
NDIR	Nodal	Euler Angles	VECTORS	NDIRVECT
EDIR	Elemental	Scalar	XY	EDIRXY
EDIR	Elemental	Scalar	YZ	EDIRYZ
EDIR	Elemental	Scalar	XZ	EDIRXZ
EDIR	Elemental	Euler Angles	VECTORS	EDIRVECT(
ECENT	Elemental	Scalar	X	ECENTX
ECENT	Elemental	Scalar	Y	ECENTY
ECENT	Elemental	Scalar	Z	ECENTZ
LOC	Nodal	Scalar	X	LOCX
LOC	Nodal	Scalar	Y	LOCY
LOC	Nodal	Scalar	Z	LOCZ
LAYNUMBER	Elemental	Scalar		LAYNUMB
PNUM	Elemental	Scalar	TYPE	PNUMTYP
PNUM	Elemental	Scalar	REAL	PNUMREA
PNUM	Elemental	Scalar	MAT	PNUMMA
PNUM	Elemental	Scalar	SEC	PNUMSEC
PNUM	Elemental	Scalar	ESYS	PNUMESY
PNUM	Elemental	Scalar	ELEM	PNUMELEI
MESH_	Elemental	Scalar	ELEMENT_QUALITY	MESH_ELE
MESH_	Elemental	Scalar	ASPECT_RATIO	MESH_ASF
MESH_	Elemental	Scalar	JACOBIAN_RATIO	MESH_JAC
MESH_	Elemental	Scalar	WARPING_FACTOR	MESH_WA
MESH_	Elemental	Scalar	PARALLEL_DEVIATI...	MESH_PAF
MESH_	Elemental	Scalar	MAXIMUM_CORN...	MESH_MA
MESH_	Elemental	Scalar	SKEWNESS	MESH_SKE

图 4-70　可列的后处理选项

Step11：选择 ENERGY 选项，并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create User Defined Result 选项，此时绘图窗口显示图 4-71 所示的列表。

Step12：此时在 Outline 列表框中出现 ENERGYPOTENTIAL 选项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results，此时绘图窗口显示图 4−72 所示的云图。

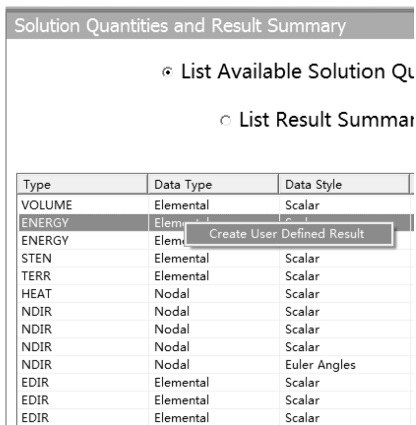


图 4−71　选择项



图 4−72　云图

Step13：选择 Solution（A6）命令，再选择工具栏中的 User Defined Result 命令，此时出现图 4−67 所示的 Details of “Defined Result”设置面板，在窗口的 Expression 栏中输入“=2*sqrt(TEMP^3)”，并进行计算，此时将显示图 4−73 所示的云图。

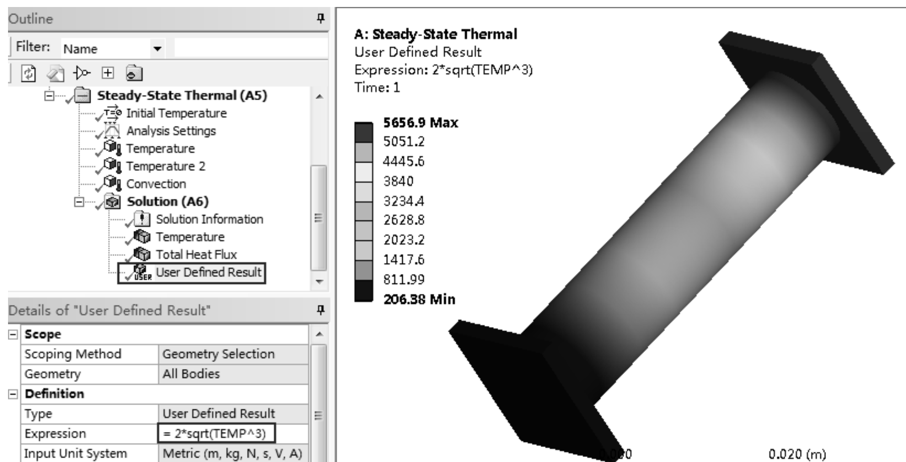


图 4−73　自定义云图

4.3.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，在文件名中输入 Part，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

4.4 本章小结

本章以有限元分析的一般过程为总线，分别介绍了 ANSYS Workbench 17.0 几何建模的方法及集成在 Workbench 平台上的 DesignModeler 几何建模工具的建模方法；另外，通过四个应用实例讲解了在 Workbench 平台中划分与导入网格的方法；最后，简单介绍了 Workbench 平台上 Mechanical 的后处理功能。



项目范例篇

第 5 章　稳态热分析

本章主要以对稳态热分析的基础理论公式的简单推导作为出发点，对稳态传热进行简单介绍，并分别通过解析和仿真两种方法对同一个问题进行计算，并对比了计算结果，希望读者通过对每一个步骤的学习来体会有限元分析的方法。

知识点＼学习目标	了　解	理　解	应　用	实　践
稳态热分析理论	√	√		
稳态热有限元分析操作方法		√	√	√
传热的基本应用		√	√	√

5.1　稳态导热

在稳态导热过程中，物体的温度不随时间发生变化，即 $\frac{\partial t}{\partial \tau}=0$。这时，若物体的热物性为常数，导热微分方程式具有下列形式：

$$\nabla^2 t+\frac{q_v}{\lambda}=0 \tag{5-1}$$

在没有热源的情况下，上式简化为：

$$\nabla^2 t=0 \tag{5-2}$$

工程上的许多导热现象，可以归结为温度仅沿着一个方向变化且与时间无关的一维稳态导热过程，例如通过房屋墙壁和长热力管道管壁的导热等。本节将针对各种不同的边界条件，分析通过平壁和圆柱壁的一维稳态导热。此外，还将讨论供热与空调等系统中常用的肋壁导热过程。对于二维导热过程，本节只进行简要的叙述。

5.2　平壁导热理论

下面介绍平壁导热的第一类边界条件。

设一厚度为 δ 的单层平壁，如图 5-1a 所示，无内热源，材料的导热系数 λ 为常数。平壁两侧表面分别维持均匀稳定的温度 t_{w1} 和 t_{w2}。若平壁的高度与宽度远大于其厚度，则称为

无限大平壁。这时，可以认为沿高度与宽度两个方向的温度变化率很小，而只沿厚度方向发生变化，即一维稳态导热。通过实际计算证实，当高度和宽度是厚度的 10 倍以上时，可近似地作为一维导热问题处理。

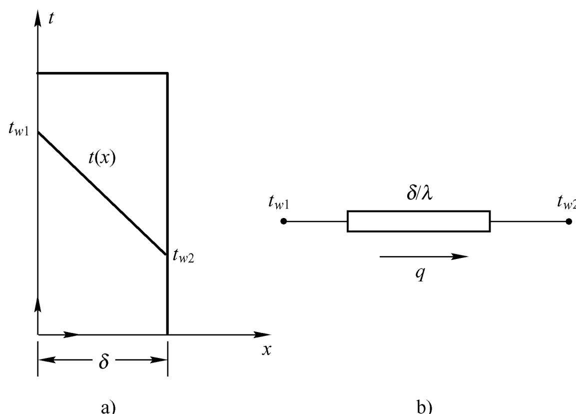


图 5-1　单层平壁的导热

对上述问题，式（5-2）可写成：

$$\frac{d^2t}{dx^2}=0 \tag{5-3}$$

两个边界面都给出第一类边界条件，即已知：

$$t\big|_{x=0}=t_{w1} \tag{5-4}$$

$$t\big|_{x=b}=t_{w2} \tag{5-5}$$

式（5-3）～式（5-5）给出了这一导热问题的完整数学描写。求解这一组方程式，就可以得到单层平壁中沿厚度方向的温度分布 $t=f(x)$ 的具体函数形式。

式（5-3）较为简单，可以直接积分求解，其解为：

$$t=c_1x+c_2 \tag{5-6}$$

式中，c_1 和 c_2 是待定的积分常数，它们可以由所给出的边界条件确定。将边界条件式（5-4）和（5-5）分别代入式（5-6），可以得到：

$$c_2=t_{w1} \tag{5-7}$$

$$c_1=-\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta}x \tag{5-8}$$

将 c_1 和 c_2 代入式（5-6），经整理后，可以得到单层平壁中的温度分布为：

$$t=t_{w1}-\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta}x \tag{5-9}$$

已知温度分布之后，可以由傅里叶定律式（1-15）求得通过单层平壁的导热热流密度。这时，式（1-15）中 $\frac{\partial t}{\partial x}=\frac{dt}{dx}$，可对式（5-9）求导数得到，

$$\frac{dt}{dx}=c_1=-\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta} \tag{5-10}$$

而

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \text{ W/m}^2 \tag{5-11}$$

若在无限大平壁两侧温度 t_{w1} 和 t_{w2} 氛围内，导热系数随温度发生变化，即式（1-17），$\lambda = \lambda_0(1+bt)$。平壁厚度仍为 δ，平壁两侧表面处边界条件也与上述的相同。这时，平壁内的温度分布和通过平壁的导热量，应求解下列导热微分方程式得到，

$$\frac{d}{dx}\left(\lambda \frac{dt}{dx}\right) = 0 \tag{5-12}$$

将（1-17）代入上式并积分，得

$$\lambda_0(1+bt)\frac{dt}{dx} = c_1 \tag{5-13}$$

再对上式进行积分，可得：

$$\lambda_0\left(t + \frac{1}{2}bt^2\right) = c_1 x + c_2 \tag{5-14}$$

利用给定的边界条件，将式（5-4）和（5-5）分别代入式（5-14），可以求得：

$$c_2 = \lambda_0\left(t_{w1} + \frac{1}{2}bt_{w2}^2\right) \tag{5-15}$$

$$c_1 = -\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}\lambda_0\left[1 + \frac{1}{2}b(t_{w1} + t_{w2})\right] \tag{5-16}$$

上式也可改成：

$$\left(t + \frac{1}{b}\right)^2 = \left(t_{w1} + \frac{1}{b}\right)^2 - \left[\frac{2}{b} + (t_{w1} + t_{w2})\right]\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}x \tag{5-17}$$

不难看出，当导热系数随温度变化时，平壁内的温度分布是二次曲线方程，如图 5-2 所示；当导热系数为常数时，即 $b = 0$、$\lambda = \lambda_0$ 时，式（5-13）简化为与式（5-11）完全一样的结果。

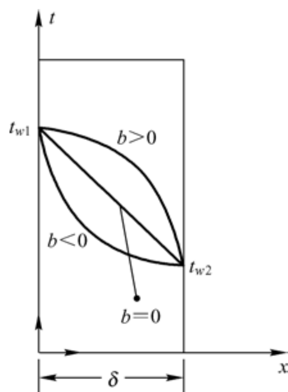


图 5-2 导热系数随温度变化时平壁内的温度分布

通过平壁的导热热流密度为：

$$q = -\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} \tag{5-18}$$

参看式（5−13），得：

$$q = -c_1 = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}\lambda_0\left[1 + \frac{1}{2}b(t_{w1} + t_{w2})\right] \tag{5-19}$$

对比上式与式（5−11）可以看出，若以平壁的平均温度 $t = \frac{1}{2}(t_{w1} + t_{w2})$ 按式（1−17）计算导热系数，平壁导热的热流密度仍可以利用导热系数为常数时的式（5−11）计算。

利用前面所述的热阻概念，式（5−11）可以改写成类似于电学中的欧姆定律的形式：

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\dfrac{\delta}{\lambda}} \ \mathrm{W/m^2} \tag{5-20}$$

式中，δ/λ 就是单位面积平壁的导热热阻，图 5−1b 示出了单层平壁导热过程的模拟电路图。

应当指出，是为了说明求解导热问题的一般方法，才采用上述的直接积分法求解微分方程式。事实上，对于一维稳态导热问题，因为热流密度实常数，可由傅里叶定律分离变量并按相应边界条件积分：

$$q\int_0^{\delta}\mathrm{d}x = -\lambda\int_{t_{w1}}^{t_{w2}}\mathrm{d}t \tag{5-21}$$

整理上式可得：

$$q = \lambda\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \ \mathrm{W/m^2} \tag{5-22}$$

上式与式（5−11）完全一样。尽管这种推导方法更为简单，但是它不是普遍适用的方法，仅适用于一维稳态导热。

在工程计算中，常常遇到多层平壁，即由多层不同材料组成的平壁。例如，房屋的墙壁，以红砖为主砌成，内有白灰层，外抹水泥砂浆；锅炉炉墙，内为耐热材料层，中为保温材料层，外为保温材料层，最外为钢板。这些都是多层平壁的实例。

图 5−3a 表示一个由三层不同材料组成的无限大平壁。各层的厚度分别为 δ_1 、δ_2 和 δ_3，导热系数分别为 λ_1 、λ_2 和 λ_3，且均为常数。已知多层平壁的两侧表面分别维持均匀稳定的温度 t_{w1} 和 t_{w4}，要求确定三层平壁中的温度分布和通过平壁的导热量。

若各层之间紧密地结合，则彼此解出的两表面具有相同的温度。设两个接触面的温度分别为 t_{w2} 和 t_{w3}，如图 5−3a 所示。在稳态情况下，通过各层的热流密度式相等的，对于三层平壁的每一层可以分别写出：

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta_1/\lambda_1} = \frac{1}{R_{\lambda 1}}(t_{w1} - t_{w2}) \tag{5-23}$$

$$q=\frac{t_{w2}-t_{w3}}{\delta_1/\lambda_2}=\frac{1}{R_{\lambda 2}}(t_{w2}-t_{w3}) \tag{5-24}$$

$$q=\frac{t_{w3}-t_{w4}}{\delta_1/\lambda_3}=\frac{1}{R_{\lambda 3}}(t_{w3}-t_{w4}) \tag{5-25}$$

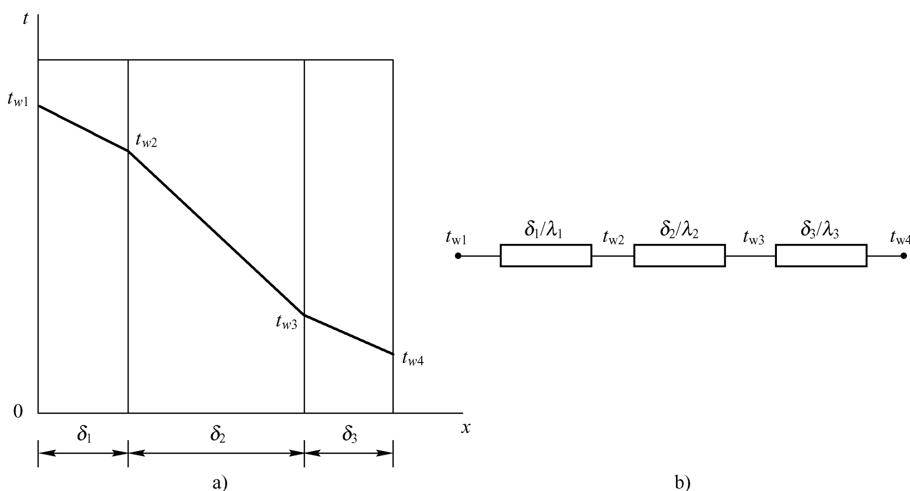


图 5-3　多层平壁的导热

式中 $R_{\lambda i}=\frac{\delta_i}{\lambda_i}$ 是第 i 层平壁单位面积导热热阻。

由式（5-24）可得：

$$\begin{aligned} t_{w1}-t_{w2}&=qR_{\lambda 1}\\ t_{w2}-t_{w3}&=qR_{\lambda 2}\\ t_{w3}-t_{w4}&=qR_{\lambda 3}\end{aligned} \tag{5-26}$$

将式（5-26）中各式相加并整理，得：

$$q=\frac{t_{w1}-t_{w4}}{R_{\lambda 1}+R_{\lambda 2}+R_{\lambda 3}}=\frac{t_{w1}-t_{w4}}{\sum_1^3 R_{\lambda i}} \tag{5-27}$$

式（5-27）与串联电路的情形相类似。多层平壁的模拟电路图如图 5-3b 所示，它表明多层平壁单位面积的总热阻等与各层热阻之和。于是，对于 n 层平壁导热，可以直接写出：

$$q=\frac{t_{w1}-t_{wn+1}}{\sum_1^n R_{\lambda i}} \tag{5-28}$$

式中，$t_{w1}-t_{wn+1}$ 是 n 层平壁的总温差，$\sum_1^n R_{\lambda i}$ 是平壁单位面积的总热阻。

因为在每一层中温度分布分别都是直线规律，所以在整个多层平壁中，温度分布将是一折线。层与层之间接触面的温度，可以通过式（5-28）求得，对于 n 层多层平壁，第 i 层与

第 $i+1$ 层之间接触面的温度 t_{i+1} 为：

$$t_{wi+1} = t_{w1} - q(R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + \cdots + R_{\lambda i}) \quad (5\text{-}29)$$

5.3 稳态导热案例一——单层平壁导热

本节将通过一个简单的案例介绍单层平壁结构稳态导热过程的解析计算方法及数值仿真计算的操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中单层平壁结构的建模方法及求解过程，同时掌握单层平壁导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter5\char05-1\ex1.wbpj

5.3.1 问题描述

某冷藏库壁厚 150mm，如图 5-4 所示，其所用的保温材料导热系数为 0.003 W/(m·K)，壁内外两侧面的表面传热系数分别为 $h_1 = 5$ W/(m^2·K) 及 $h_2 = 15$ W/(m^2·K)，两侧空气温度分别为 $t_{f1} = 5$ ℃和 $t_{f2} = 30$ ℃（忽略金属保护层的导热热阻），试计算该壁的各项热阻、传热系数及热流密度。

5.3.2 解析方法计算

【解】 单位壁面积各项热阻

$$R_{h1} = \frac{1}{h_1} = \frac{1}{5} = 0.2 \ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$$

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0.15}{0.003} = 50 \ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$$

$$R_{h2} = \frac{1}{h_2} = \frac{1}{15} = 0.0667 \ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$$

所以总传热热阻 $R_k = R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2} = 0.2 + 50 + 0.0667 = 50.2667 \ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$

如传热系数 $k = \frac{1}{R_k} = \frac{1}{50.2667} = 0.01989 \ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$

则热流密度为 $q = k\Delta t = 0.01989 \times (30-5) = 0.49725 \ \mathrm{W/m^2}$

【讨论】 本例的传热热阻接近于保温材料的导热热阻，面壁的传热系数将完全由壁的保温材料的导热系数决定，因此要提高保温性能，主要是改进保温材料，采用低导热系数的材料。单独计算各项热阻，有助于了解各热阻的差异和分析传热过程中的问题，这是传热计算常用的方法。案例软件操作详见 5.3.3 小节。

5.3.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17

命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5-5 所示。



图 5-4　模型

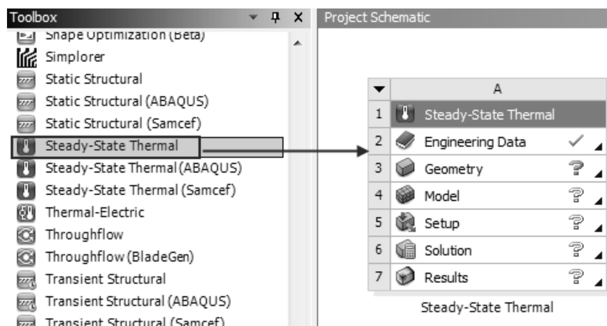


图 5-5　创建分析项目 A

5.3.4 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 5-6 所示。

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。单击 DM 窗口中的 Tree Outline→XYPlane，再选择 Sketching 选项卡，选择 Draw→Rectangle，从坐标原点开始绘制一个矩形。

Step3：选择 Dimensions→General 命令，标注矩形的长和宽，如图 5-7 所示，宽度 H1 为 150，长度 V2 为 1000。

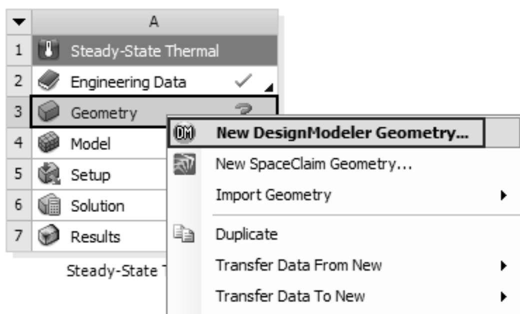


图 5-6　导入几何体

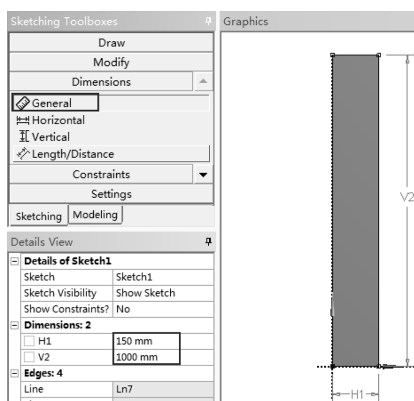


图 5-7　生成后的 DesignModeler 界面

Step4：切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Extrude 拉伸命令，在 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch1；在 FD1,Depth（>0）栏中输入拉伸长度为 1000，其余默认即可，如图 5-8 所示。单击工具栏中的 Generate 命



令，生成图 5-9 所示的几何图形。

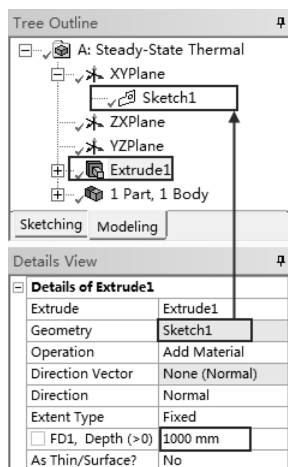


图 5-8　设置

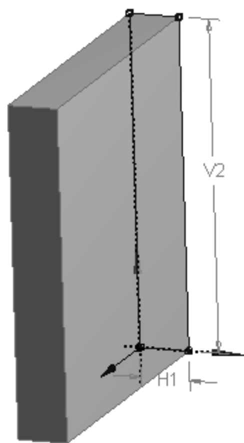


图 5-9　生成模型

Step5： 单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex1.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step6： 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

5.3.5 创建分析项目

Step1： 在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 5-10 所示。

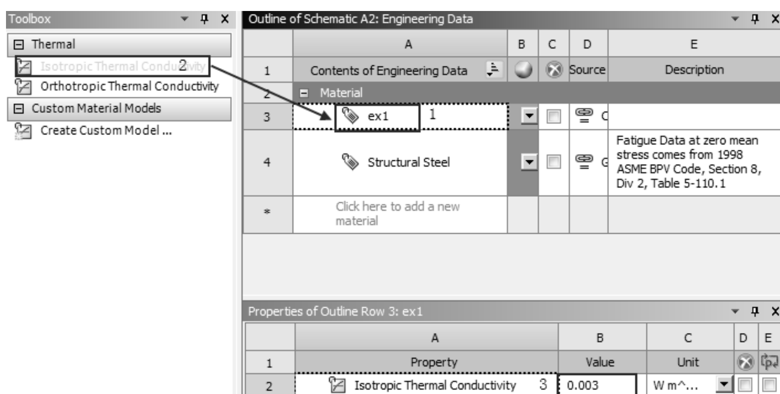


图 5-10　设置材料

Step2： 在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料名称为 ex1，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 ex1 中，此时在 Properties of Outline Row 3：ex1 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 中输入 0.003，在工具栏中单击 A2:Engineering Data ×中的 X 关闭材料

设置窗口。

Step3: 双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3 栏 Model 项，进入图 5-11 所示的 A：Steady-State Thermal-Mechanical[ANSYS Multiphysics]界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

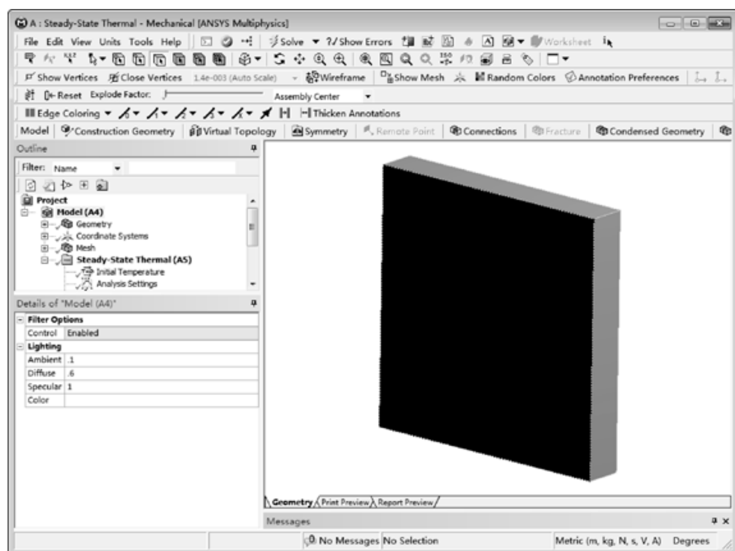


图 5-11 Mechanical 界面

Step4: 选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-12 所示。

Step5: 单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 ex1，选择即可将其添加到模型中。

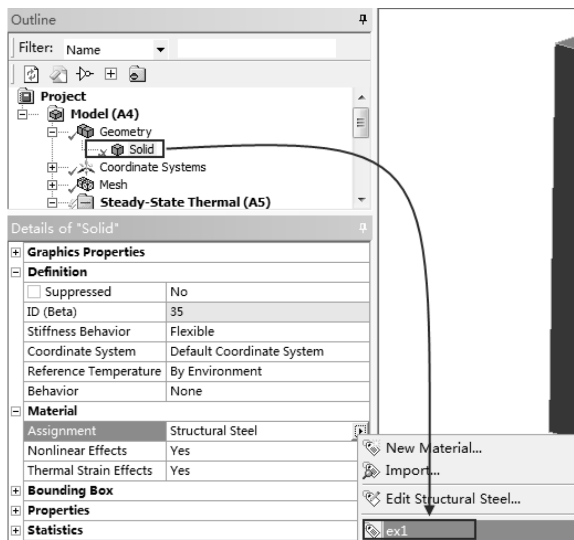


图 5-12 修改材料属性

5.3.6 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Sizing 命令，如图 5-13 所示。

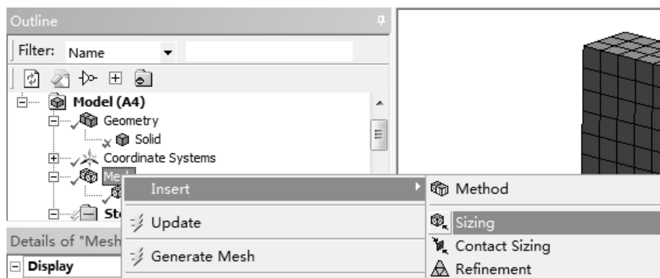


图 5-13 快捷菜单

Step2：在 Details of“Edge Sizing”详细设置窗口中作如下操作：在 Geometry 栏中选中几何体所有边，并单击 Apply 按钮，如图 5-14 所示；在 Element Size 栏中输入网格大小为 5.e-002m，其余默认即可。

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5-15 所示。

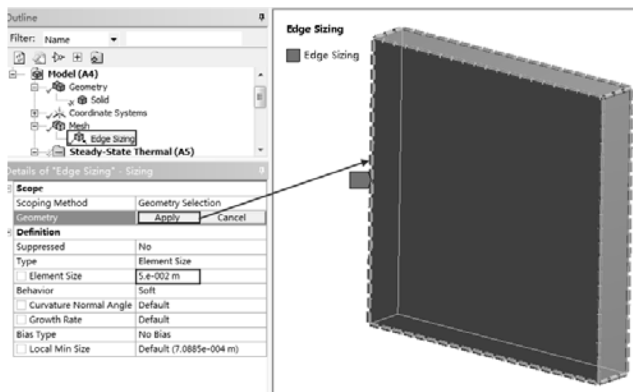


图 5-14 网格设置

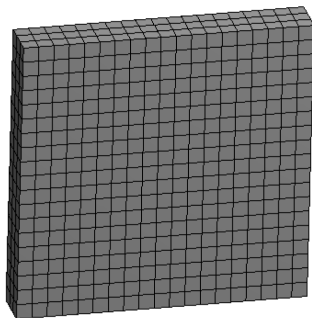


图 5-15 网格效果

5.3.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（B5）选项，此时会出现图 5-16 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Convection（对流）命令，此时在分析树中会出现 Convection 选项，如图 5-17 所示。

Step3：如图 5-18 所示，选中 Convection，单击 Details of“Convection2”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择实体一个面（此面为 X 轴最小位置的面）；在 Definition→Film Coefficient 栏中输入 5；在 Ambient Temperature 栏中输入环境温度为 5，其余默认即可，完

成一个热载荷的添加。

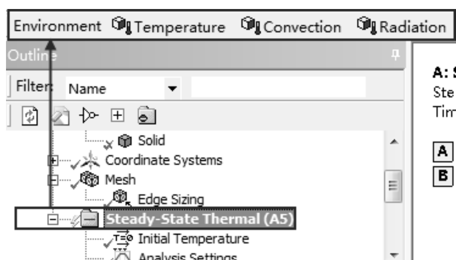


图 5-16　Environment 工具栏

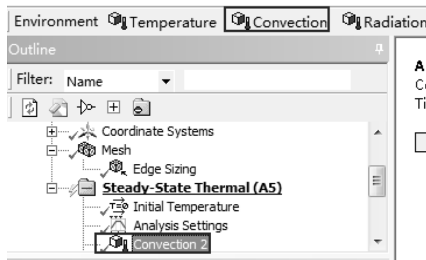


图 5-17　添加载荷

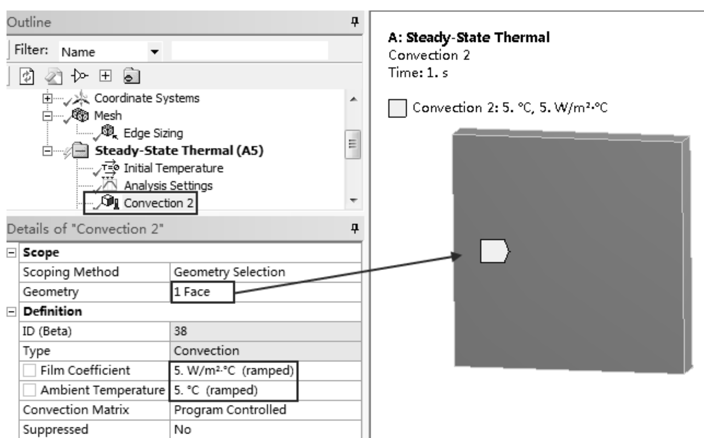


图 5-18　施加载荷

Step4：如图 5-19 所示，选中 Convection，在 Details of“Convection2”设置面板中作如下操作：在 Geometry 中选择选择实体一个面（此面为 X 轴最大位置的面）；在 Definition→Film Coefficient 栏中输入 15；在 Ambient Temperature 栏中输入环境温度为 30，其余默认即可，完成一个热载荷的添加。

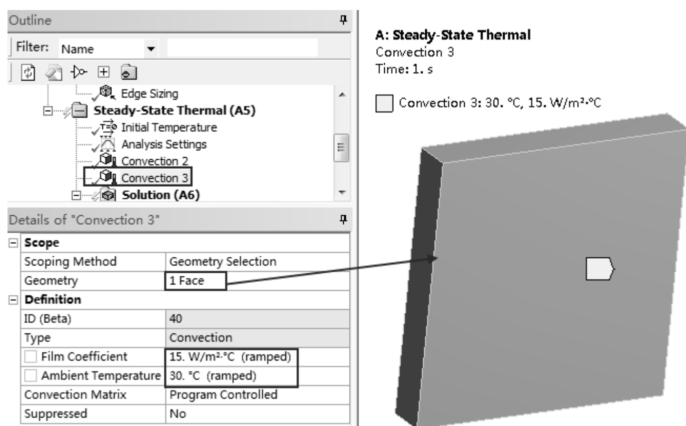


图 5-19　施加载荷

Step5：在 Outlines（分析树）中选择 Steady-State Thermal（A5）选项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 5-20 所示。

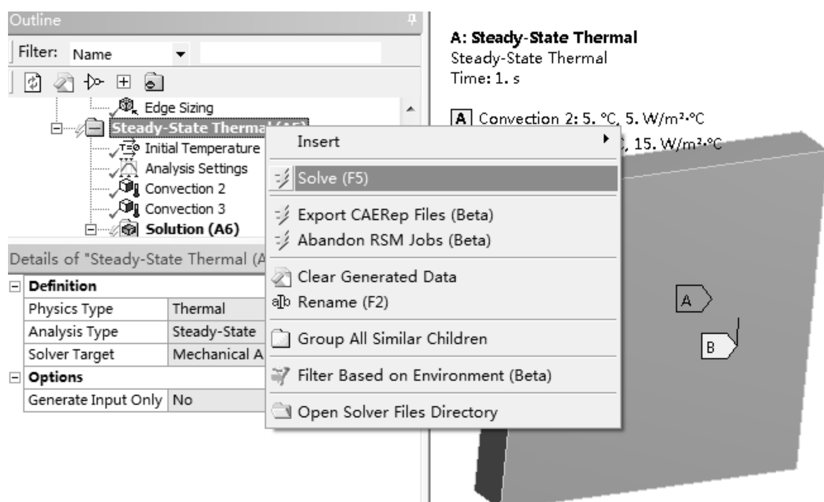


图 5-20　求解

5.3.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 5-21 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Total Heat Flux 命令，如图 5-22 所示，此时在分析树中会出现 Total Heat Flux（热流率）选项。

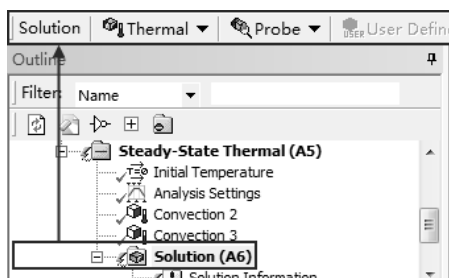


图 5-21　Solution 工具栏

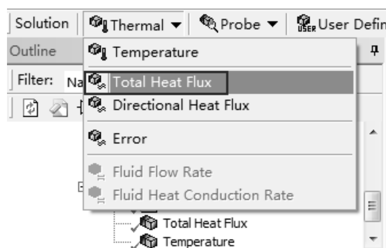


图 5-22　添加温度选项

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Solution（A6）选项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 5-23 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形），如图 5-24 所示。

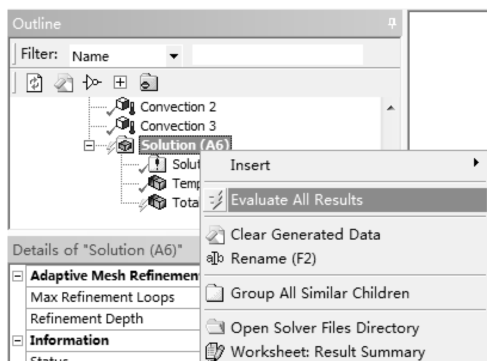


图 5-23 快捷菜单

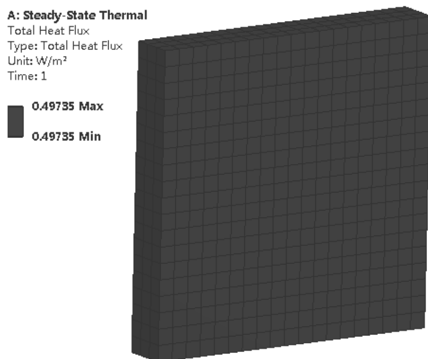


图 5-24 温度分布

Step5：以同样的操作方法查看几何表面温度，如图 5-25 所示。

Step6：在绘图区域中单击 Y 轴，使图形 Y 轴垂直于绘图平面，如图 5-26 所示。

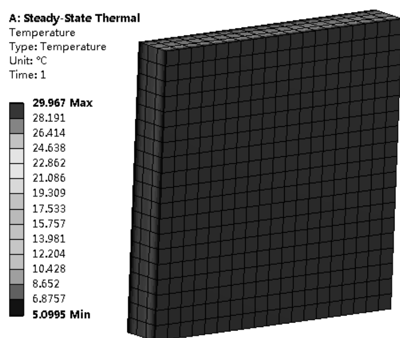


图 5-25 热流量云图

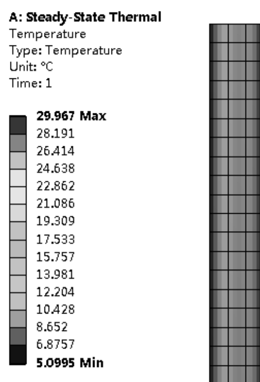


图 5-26 使图形 Y 轴垂直于绘图平面

Step7：单击工具栏中的按钮，然后在绘图区域中从左上角到右下角画一条直线，如图 5-27 中箭头方向所示。

Step8：旋转视图（见图 5-28），其中显示了温度场在模型体内部的分布情况。

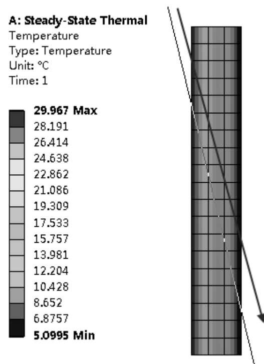


图 5-27 创建剖面线

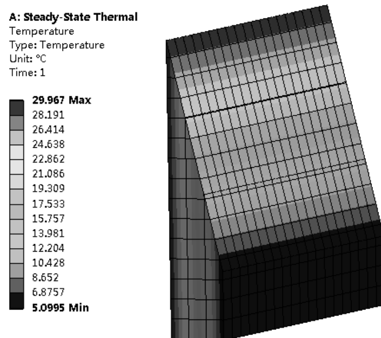


图 5-28 实体内部温度场分布

5.3.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

【分析】 解析解与仿真解分别为 0.49725 和 0.49735。

从分析结果可以看出，仿真计算的结果与解析解一致。

5.4 稳态导热案例二——复合层平壁导热

本节将通过一个简单的案例介绍复合层平壁结构稳态导热过程的解析计算方法及数值仿真计算的操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台复合层平壁结构的建模方法及求解过程，同时掌握复合层平壁导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter5\char05-2\ex2.wbpj

5.4.1 问题描述

有一个锅炉炉内墙由三层组成，如图 5-29 所示，内层是厚度 $\delta_1 = 230$ mm 的耐火砖层，导热系数 $\lambda_1 = 1.10$ W/(m·K)；外层是厚 $\delta_3 = 240$ mm 的红砖层，$\lambda_3 = 0.58$ W/(m·K)；两层中间填以 $\delta_2 = 50$ mm、$\lambda_2 = 0.10$ W/(m·K) 的石棉保温层。已知炉墙内、外两表面温度 $t_{w1} = 500$ ℃和 $t_{w2} = 50$ ℃，试求通过炉墙的导热热流密度及红砖层的最高温度。

5.4.2 解析方法计算

【解】 1）求热流密度先计算各层单位面积的导热热阻。

$$R_{\lambda 1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{0.23}{1.10} = 0.2091\ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$$

$$R_{\lambda 2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0.05}{0.10} = 0.5\ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$$

$$R_{\lambda 3} = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0.24}{0.58} = 0.4137\ (\mathrm{m^2 \cdot K})/\mathrm{W}$$

得出
$$q = \frac{\Delta t}{\sum_1^3 R_{\lambda i}} = \frac{500-50}{0.2091+0.50+0.4137} = \frac{450}{1.1228} = 400.78\ \mathrm{W/m^2}$$

2）求红砖层的最高温度：红砖层的最高温度是红砖层与石棉层之间的接触面温度 t_{w3}。根据公式得：

$$t_{w3} = t_{w1} - q(R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}) = 500 - 400.78(0.2091 + 0.50) = 215.8069\ ℃$$

【讨论】 根据多层平壁导热的模拟电路可知，多层平壁的总温度差是按各层热阻占总热阻的比例大小分配到每一层的，所以红砖层中的温度差为：

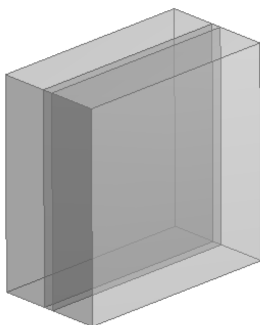
$$\Delta t = 450/(0.4137/1.1228) = 165.8042\ ℃$$

$$t_{w3} = 165.8042 + 50 = 215.8042\ ℃$$

5.4.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5-30 所示。


图 5-29 模型

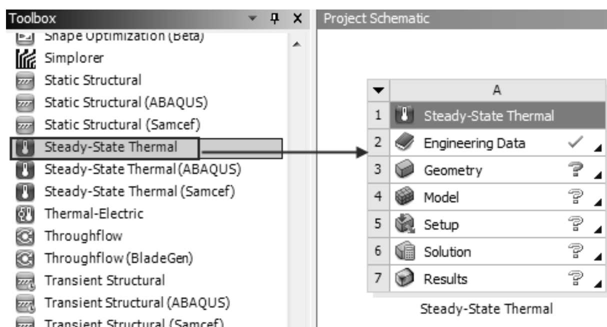


图 5-30 创建分析项目 A

5.4.4 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 5-31 所示。

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，单击 DM 窗口中的 Tree Outline→XYPlane，再选择 Sketching 选项卡，选择 Draw→Rectangle，从坐标原点开始绘制一个矩形，然后依次再继续绘制两个矩形。

Step3：选择 Dimension→General，标注矩形的长和宽，如图 5-32 所示，宽度 H2 为 230、H3 为 50、H4 为 240、长度 V1 为 1000。

Step4：切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Extrude（拉伸）命令，在 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch1；在 Operation 栏中选择 Add Frozen；在 FD1,Depth（>0）栏中输入拉伸长度为 1000，其余默认即可，如图 5-33 所示。创建的几何图形如图 5-34 所示。



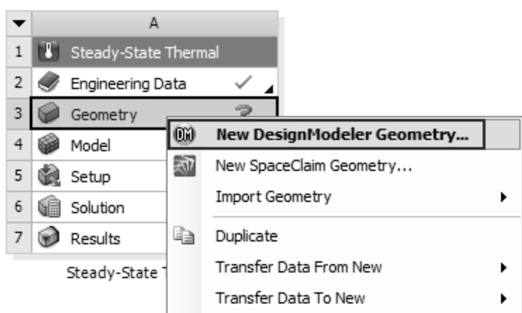


图 5-31　导入几何体

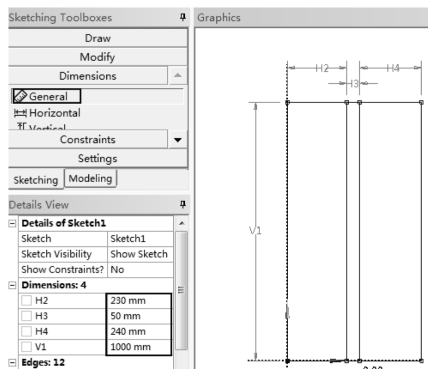


图 5-32　生成后的 DesignModeler 界面

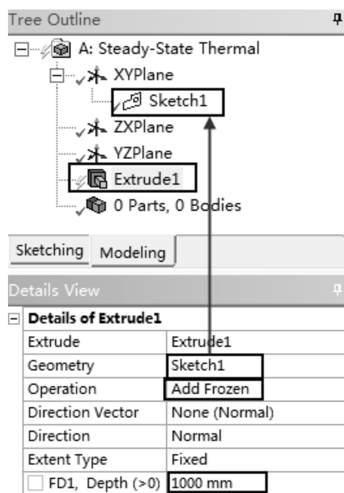


图 5-33　设置

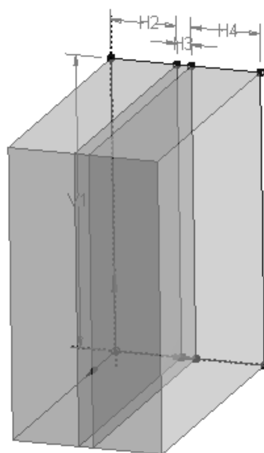


图 5-34　创建的几何模型

注意：Frozen 为冻结后的几何体，显示的几何图形处于半透明状态。

Step5：单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex2.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step6：回到 DesignModeler 界面，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

5.4.5 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 5-35 所示。

Step2：在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入三种材料的名称分别为 mat1、mat2 及 mat3，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat1 中，此时在 Properties of Outline Row 3：mat1 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 中输入 1.1，mat2 的导热系数为 0.1，mat3 的导热系

数为 0.58，在工具栏中单击 A2:Engineering Data ×中的 ✕ 关闭材料设置窗口。

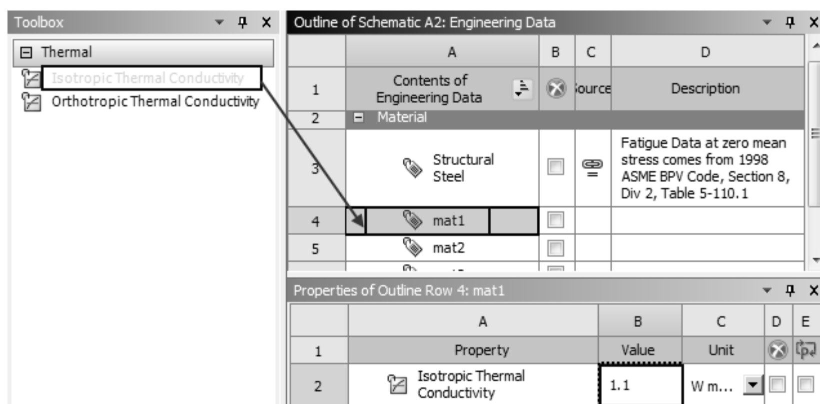


图 5-35 设置材料

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3 栏 Model 项，进入图 5-36 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

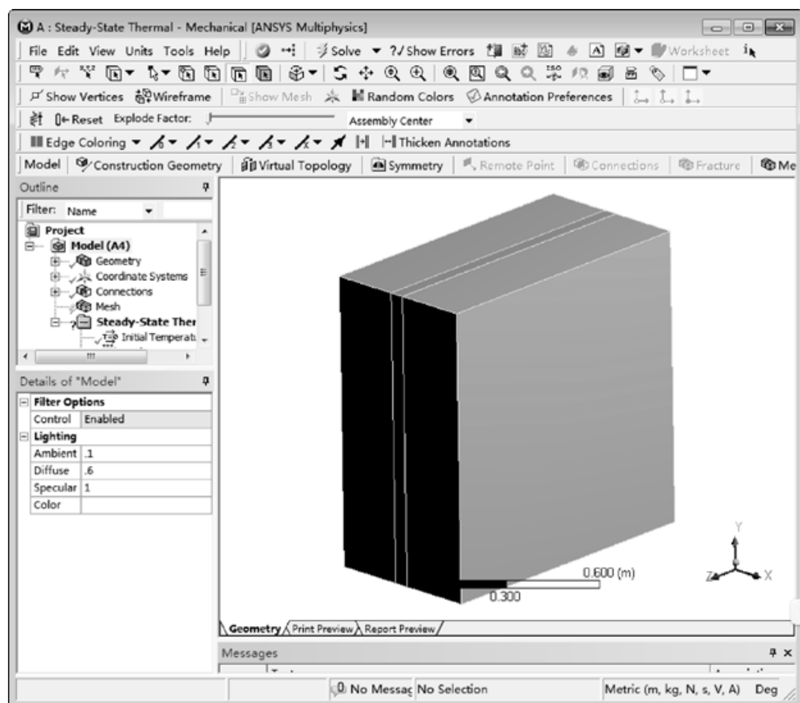


图 5-36 Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Solid，此时可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-37 所示。

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的 ▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat1，选择即可将其添加到模型中去。



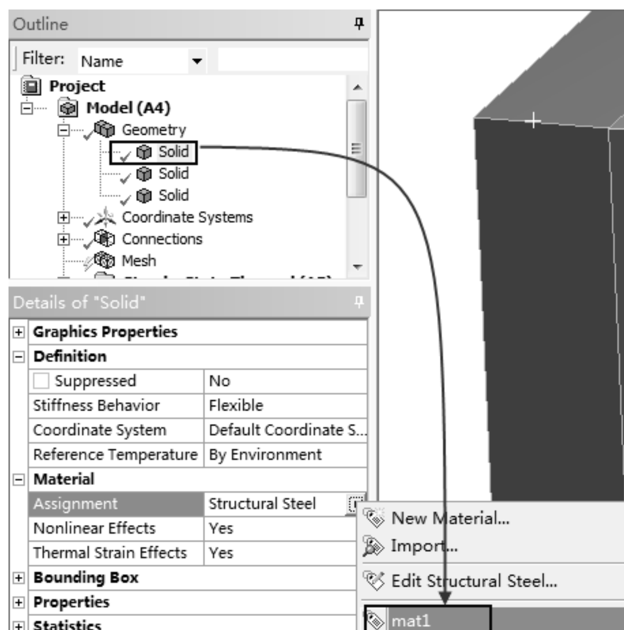


图 5-37　修改材料属性

用同样的方法将第二个 solid 的材料设置为 mat2，第三个 solid 的材料设置为 mat3。

5.4.6 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Sizing 命令，如图 5-38 所示。

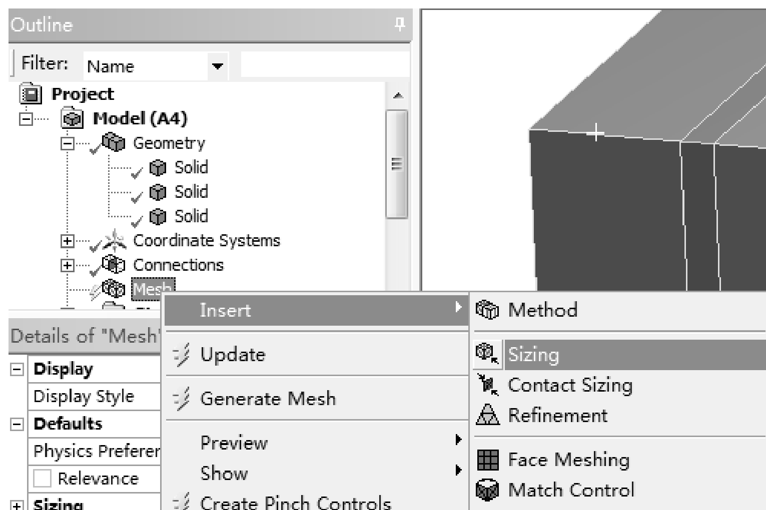


图 5-38　快捷菜单

Step2：在 Details of“Edge Sizing”详细设置窗口中作如下操作：在 Geometry 栏中选中几何体所有边，并单击 Apply 按钮，如图 5-39 所示；在 Element Size 栏中输入网格大小为

5.e−002m，其余默认即可。

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Mesh 选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5−40 所示。

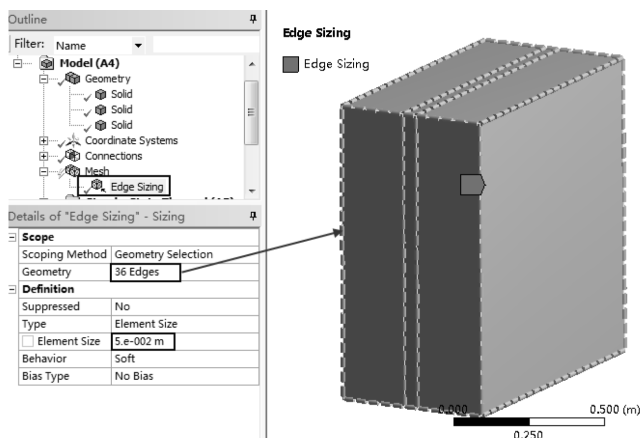


图 5−39 网格设置

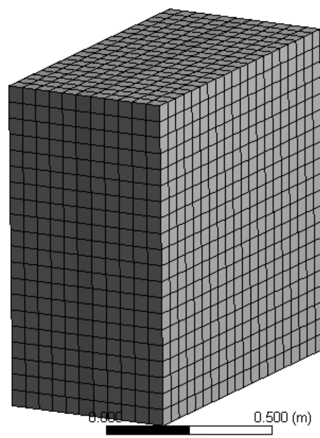


图 5−40 网格效果

5.4.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady−State Thermal（A5）选项，此时会出现图 5−41 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 5−42 所示。

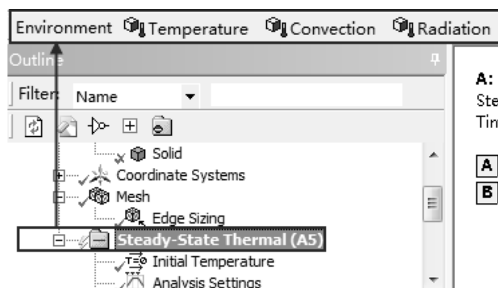


图 5−41 Environment 工具栏

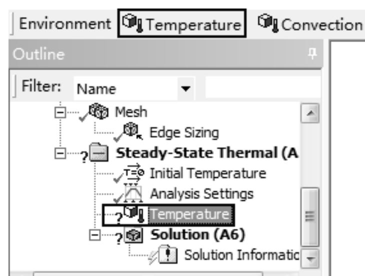


图 5−42 添加载荷

Step3：如图 5−43 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择实体一个面（此面为 X 轴最小位置的面）；在 Definition→Magnitude 栏中输入 500；其余默认即可，完成一个温度的添加。

Step4：如图 5−44 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature2”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择实体一个面（此面为 X 轴最大位置的面）；在 Definition→Magnitude 栏中输入 50；其余默认即可，完成另一个温度的添加。

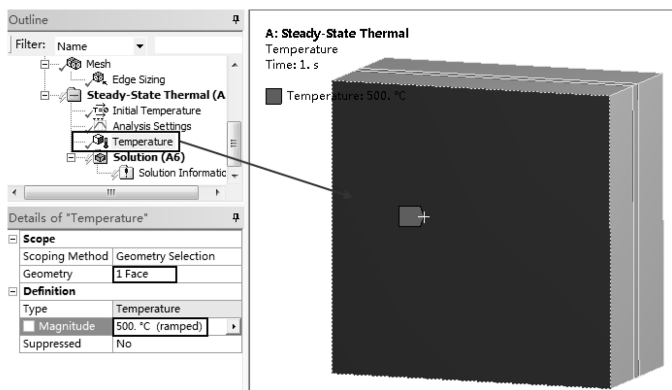


图 5-43 施加载荷

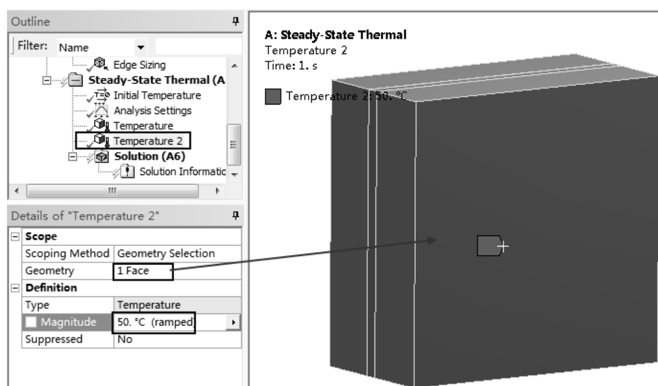


图 5-44 施加载荷

Step5：在 Outlines（分析树）中选择 Steady-State Thermal（A5）选项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 5-45 所示。

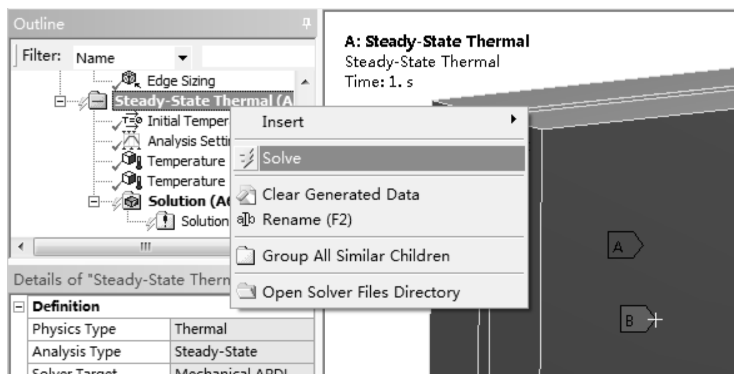


图 5-45 求解

5.4.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 5-46 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 5-47 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

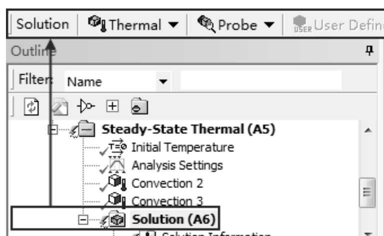


图 5-46　Solution 工具栏

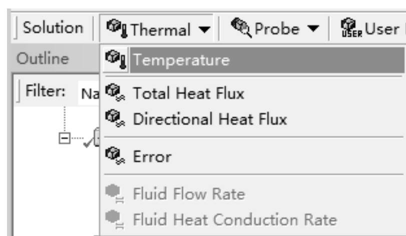


图 5-47　添加温度选项

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Solution（A6）选项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Evaluate All Results 命令，如图 5-48 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形），如图 5-49 所示。

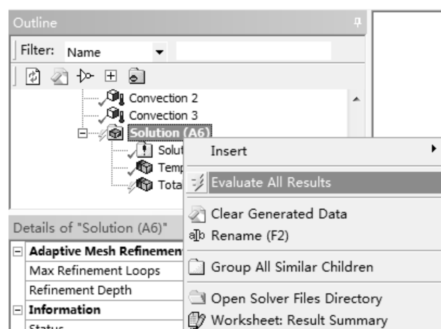


图 5-48　快捷菜单

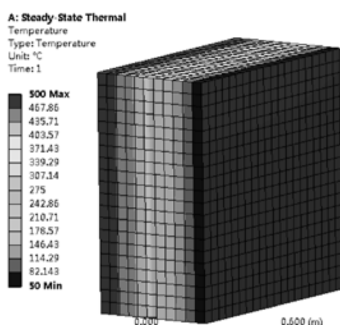


图 5-49　温度分布

Step5：单击 Solution 选项，然后选择 mat3 材料的几何体并单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide Body（F9）命令，如图 5-50 所示，则 mat3 几何将被隐藏，如图 5-51 所示。

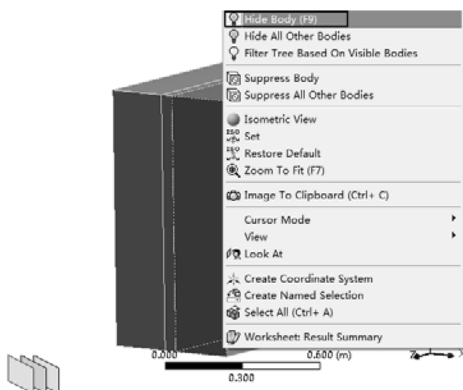


图 5-50　在快捷菜单中选择命令

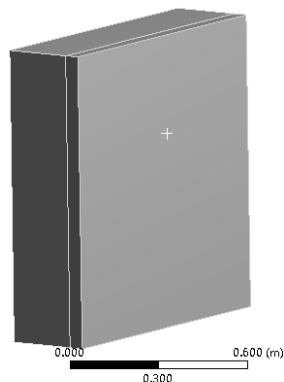


图 5-51　mat3 几何被隐藏

Step6：如图 5-52 所示，单击工具栏中的面选择工具，选择当前状态下 X 轴坐标最大位置出的面，然后选择 Thermal→Temperature 命令。

Step7：经过计算可以看出此面的温度为 215.84℃，如图 5-53 所示。

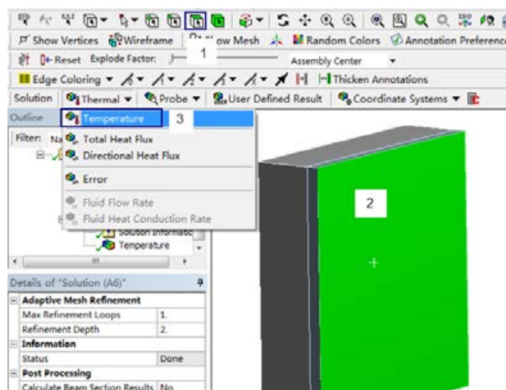


图 5-52　菜单

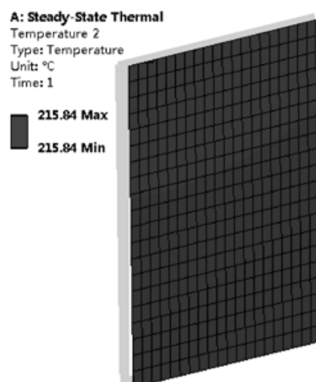


图 5-53　温度显示

Step8：以同样的操作方法查看几何表面热流密度，如图 5-54 所示。

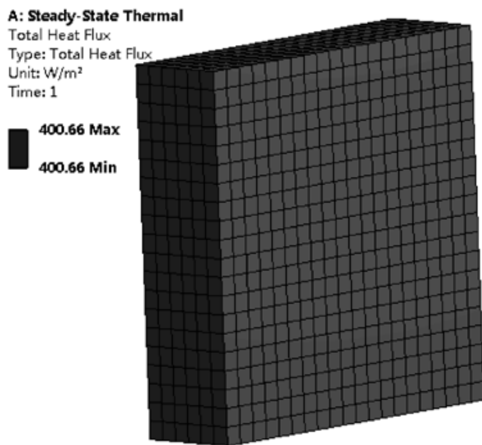


图 5-54　热流量云图

5.4.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的⊠（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的⊠（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

【分析】 解析解的温度为 215.8069，热流量为 400.78；仿真解的温度为 215.84，热流量为 400.66。

从上述分析可以看出，仿真结果与解析方法算出的结果一致。

5.5 通过圆筒壁的导热

5.5.1 第一类边界条件

图 5-55a 表示为一内径为 r_1、外径为 r_2、长度为 l 的圆筒壁，无内热源，圆筒壁材料的导热系数 λ 为常数。圆筒壁内、外两表面分别维持均匀稳定的温度 t_{w1} 和 t_{w2}，而且 $t_{w1} > t_{w2}$。试确定通过该圆筒壁的导热量及壁内的温度分布。

在工程上遇到的圆筒壁，例如热力管道，其长度通常远大于壁厚，沿着轴向的温度变化可以忽略不计。内、外壁面温度是均匀的，温度场是轴对称的。所以采用圆柱坐标系更为方便，而壁内温度仅沿着坐标 r 方向发生变化，即一维稳态温度场。于是，描写上述问题的导热微分方程式可以简化为：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}\right)=0 \tag{5-30}$$

圆筒壁内、外表面都给出第一类边界条件，即已知：

$$r=r_1,\quad t=t_{w1} \tag{5-31}$$

$$r=r_2,\quad t=t_{w2} \tag{5-32}$$

式（5-30）～式（5-32）给出了这一导热问题的完成描述。求解这一组方程式，就可以得到圆筒壁沿着半径方向的温度分布 $t=f(r)$ 的具体函数形式。

式（5-30）可以通过直接积分方法求解。积分一次，得到：

$$r\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}=C_1 \tag{5-33}$$

再积分一次，得到式（5-30）的通解为：

$$t=C_1\ln r+C_2 \tag{5-34}$$

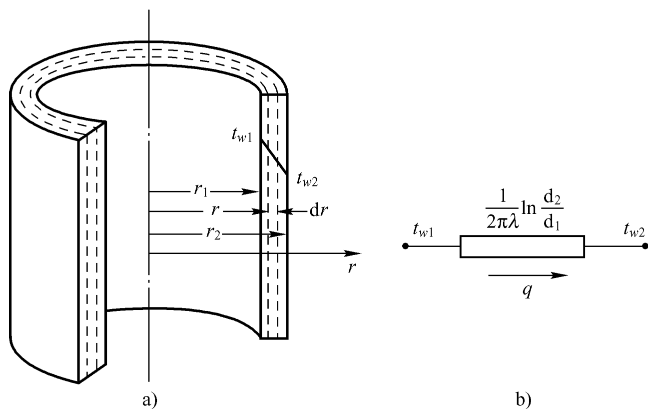


图 5-55 圆柱导热

从式（5-34）不难看出，圆筒壁中温度分布是对数曲线。式中 C_1 和 C_2 是待定的积分常

数，可由边界条件确定。将式（5-31）和式（5-32）代入式（5-34），可以得到：

$$t_{w1}=C_1\ln r_1+C_2$$

$$t_{w2}=C_1\ln r_2+C_2$$

联立求解上述两式，得到：

$$C_1=-\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \tag{5-35}$$

$$C_2=t_{w1}+\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\ln r_1 \tag{5-36}$$

将 C_1 和 C_2 的值代入式（5-34），经过整理，可以得到圆筒壁中的温度分布：

$$t=t_{w1}-(t_{w1}-t_{w2})\frac{\ln\frac{r}{r_1}}{\ln\frac{r_2}{r_1}}$$

或采用直径，写作：

$$t=t_{w1}-(t_{w1}-t_{w2})\frac{\ln\frac{d}{d_1}}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \tag{5-37}$$

已知温度分布后，可以根据傅里叶定律求得通过圆筒壁的导热热流量。值得注意，与通过无限大平壁导热过程不同，对于圆筒壁，$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}$ 并不等于常数，而是半径 r 的函数，参看式（5-33）。所以，不同半径 r 处的热流密度并不相等。但在稳态情况下，通过长度为 l 的圆筒壁的导热热流量是恒定的，根据傅里叶定律，它可以表示为：

$$\Phi=-\lambda\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}2\pi rl\ \ \mathrm{W} \tag{5-38}$$

从式（5-33）和式（5-35）可知

$$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}=-\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\frac{1}{r} \tag{5-39}$$

将上式代入式（5-38），得：

$$\Phi=2\pi\lambda l\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}}$$

或写作：

$$\Phi=2\pi\lambda l\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\ln\frac{d_2}{d_1}} \tag{5-40}$$

将式（5−40）改写为欧姆定律的形式，可得：

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\dfrac{1}{2\pi\lambda l}\ln\dfrac{d_2}{d_1}} \tag{5-41}$$

式中，$\dfrac{1}{2\pi\lambda l}\ln\dfrac{d_2}{d_1}$就是长度为$l$的圆筒壁的导热热阻，单位是℃/W。

为了工程上计算的方便，按单位管长来计算热流量，记为q_l

$$q_l = \frac{\Phi}{l} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\dfrac{1}{2\pi\lambda}\ln\dfrac{d_2}{d_1}} \tag{5-42}$$

上式中分母就是单位长度圆筒壁的导热热阻，记为$R_{\lambda l}$，单位是mK/W，图 5−55b 显示出了单位长度圆筒壁导热过程的模拟电路图。

与多层平壁一样，对于不同材料构成的多层圆筒壁，其导热热流量也可按总温差和总热阻来计算。以图 5−55a 所示的三层圆筒壁为例，已知各层相应的半径分别为r_1、r_2、r_3和r_4，各层材料的导热系数λ_1、λ_2、λ_3和λ_4均为常数，圆筒壁内、外表面的温度分别为t_{w1}和t_{w4}，而且$t_{w1} > t_{w4}$。在稳态情况下，通过单位长度圆筒壁的热流两q_l是相等的。仿照式（5−42）可以写出三层圆筒壁的导热热流量式为：

$$q_l = \frac{t_{w1} - t_{w4}}{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_{\lambda 3}} = \frac{t_{w1} - t_{w4}}{\dfrac{1}{2\pi\lambda_1}\ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{2\pi\lambda_2}\ln\dfrac{d_3}{d_2} + \dfrac{1}{2\pi\lambda_3}\ln\dfrac{d_4}{d_3}}$$

同理，对于n层圆筒壁：

$$q_l = \frac{t_{w1} - t_{wn+1}}{\sum\limits_{i=1}^{m} R_{\lambda i}} = \frac{t_{w1} - t_{w4}}{\sum \dfrac{1}{2\pi\lambda_i}\ln\dfrac{d_{i+1}}{d_i}} \tag{5-43}$$

多层圆筒壁各层之间接触的温度t_{w2}、t_{w3}…、t_{wn}，也可用类似多层平壁的方法计算。

5.5.2 第三类边界条件

设一内、外径分别为r_1和r_2的单层圆筒壁，无内热源，圆筒壁的导热系数λ为常数。圆筒壁内、外表面均给出第三类边界条件，即已知$r = r_1$，一侧流体温度为t_{f1}，对流换热的表面传热系数为h_1；$r = r_2$，一侧流体温度为t_{f2}，对流换热的表面传热系数为h_2，如图 5−56a 所示。根据式前文可知圆筒壁两侧的第三类边界条件为：

$$-\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}\bigg|_{r=r_1} = h_1 2\pi r_1 (t_{f1} - t|_{r=r_1}) \tag{5-44}$$

$$-\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}\bigg|_{r=r_2} = h_2 2\pi r_2 (t|_{r=r_2} - t_{f2}) \tag{5-45}$$

这种两侧面均为第三类边界条件的导热过程，实际上就是热流体通过圆筒壁传热给冷却体的传热过程，但导热微分方程仍为式（5−30）。前已述及，对于常稳性的稳态圆筒壁导热

问题，求解得到圆筒壁内的温度变化率为：

$$\frac{dt}{dr}=-\frac{t_{w1}-t_{w2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\frac{1}{r} \tag{5-46}$$

很明显，式（5-44）中的$t|_{r=r_1}$就是t_{w1}，式（5-45）中的$t|_{r=r_2}$就是t_{w2}，应用傅里叶定律表达式$q_l=-\lambda\frac{dt}{dr}2\pi r$，改写上述式（5-44）～式（5-46）并按传热过程的顺序排列它们，则得：

$$\begin{aligned} q_l|_{r=r_1} &= h_1 2\pi r_1(t_{f1}-t_{w1}) \\ q_l &= \frac{t_{w1}-t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{r_2}{r_1}} \\ q_l|_{r=r_2} &= h_2 2\pi r_2(t_{w2}-t_{f2}) \end{aligned} \tag{5-47}$$

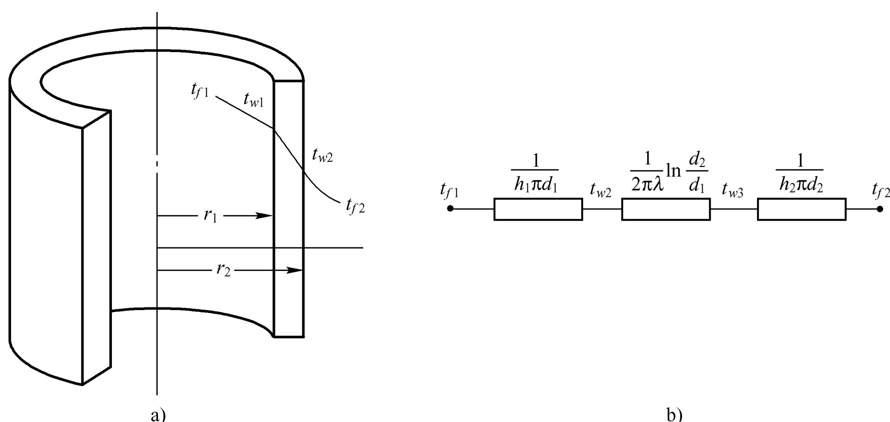


图 5-56　单层圆筒壁的传热

在稳态传热过程中，$q_l|_{r=r_1}=q_l|_{r=r_2}=q_l$。因此，联解式（5-47），消去未知的$t_{w1}$和$t_{w2}$，就可以得到热流体通过单位管长圆筒壁传给冷流体的热流量：

$$q_l=\frac{t_{f1}-t_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1}+\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{h_2 2\pi r_2}}$$

或

$$q_l=\frac{t_{f1}-t_{f2}}{\frac{1}{h_1\pi d_1}+\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{h_2\pi d_2}} \tag{5-48}$$

类似于通过平壁传热过程一样，单位长管的热流量也可以用传热系数k_l来表示：

$$q_l=k_l(t_{f1}-t_{f2}) \tag{5-49}$$

k_l表示热、冷流体之间温度相差 1℃时，单位时间通过单位长度圆筒壁的传热量，单位是$W/(m\cdot K)$。对比式（5-48）和式（5-49），得到通过单位长度圆筒壁传热过程的热阻为：

$$R_l=\frac{1}{k_l}=\frac{1}{h_1\pi d_1}+\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{h_2\pi d_2} \qquad (5-50)$$

由此可见，通过圆筒壁传热过程的热阻等于热流体、冷流体与壁面之间对流换热的热阻与圆筒壁导热热阻之和，它与串联电阻的计算方法相类似，图 5-57b 给出了热流体通过圆筒壁传热给冷流体传热过程的模拟电路图。

热流量已经求得，利用式（5-47）很容易求得t_{w1}和t_{w2}，于是圆筒壁中的温度分布也就可以求得。

若圆筒壁是由n层不同材料组成的多层圆筒壁，因为多层圆筒壁的总热阻等于各层热阻之和，于是热流体经多层圆筒壁传热给冷流体传热过程的热流量可以直接写为：

$$q_l=\frac{t_{f1}-t_{f2}}{\dfrac{1}{h_1\pi d_1}+\sum_{i=1}^{n}\dfrac{1}{2\pi\lambda_i}\ln\dfrac{d_{i+1}}{d_i}+\dfrac{1}{h_2\pi d_{n+1}}} \qquad (5-51)$$

5.6　稳态导热案例三——复合层圆筒壁导热 1

本节将通过一个简单的案例介绍复合层圆筒壁结构稳态导热过程的解析计算方法及数值仿真计算的操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中复合层圆筒壁结构的建模方法及求解过程，同时掌握复合层圆筒壁导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter5\char05-3\ex3.wbpj

5.6.1 问题描述

本实例模型一蒸汽管道，如图 5-57 所示，内、外直径分别为 150mm 和 159mm。为了减少热损失，在管外包三层隔热保温材料：内层为$\lambda_2=0.07\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$、厚度$\delta_2=5\,\mathrm{mm}$的矿渣棉；中间层为$\lambda_3=0.10\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$，厚度$\delta_3=80\,\mathrm{mm}$的石棉白云石瓦状预制瓦；外层为$\lambda_4=0.14\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$、$\delta_4=5\,\mathrm{mm}$的石棉硅藻土灰泥。已知蒸汽管道钢材的导热系数$\lambda_1=52\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$，管道内表面和隔热保温层外表面温度分别为 175℃和 50℃，试求该蒸汽管道的散热量。

5.6.2 解析方法计算

【解】 由已知条件得到：

$$d_1=0.150\,\mathrm{m},\quad d_2=0.159\,\mathrm{m},\quad d_3=0.169\,\mathrm{m},\quad d_4=0.329\,\mathrm{m},\quad d_5=0.339\,\mathrm{m}$$

下面分别计算各层单位管长圆筒壁的导热热阻。

蒸汽管壁：

$$R_{\lambda1}=\frac{1}{2\pi\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}=\frac{1}{2\pi\times52}\ln\frac{0.159}{0.15}=1.7834\times10^{-4}\ \mathrm{(m\cdot K)/W}$$

矿渣棉内层：

$$R_{\lambda 2}=\frac{1}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}=\frac{1}{2\pi\times 0.07}\ln\frac{0.169}{0.159}=1.387\times 10^{-1}\ (\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$$

石棉预制瓦：

$$R_{\lambda 3}=\frac{1}{2\pi\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}=\frac{1}{2\pi\times 0.10}\ln\frac{0.329}{0.169}=1.0602\ (\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$$

灰泥外层：

$$R_{\lambda 4}=\frac{1}{2\pi\lambda_4}\ln\frac{d_5}{d_4}=\frac{1}{2\pi\times 0.14}\ln\frac{0.339}{0.329}=3.404\times 10^{-2}\ (\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$$

根据公式，单位管长蒸汽管道的热损失为：

$$q_l=\frac{t_{w1}-t_{wn+1}}{\sum_1^4 R_{\lambda n}}=\frac{170-50}{1.7834\times 10^{-4}+1.387\times 10^{-1}+1.0602+3.404\times 10^{-2}}$$

$$=\frac{175-50}{1.233}=101.3788\text{W/m}$$

【讨论】 分析对比上述各层热阻的数值可以看出，蒸汽管壁的热阻远小于其他各保温层热阻，故在计算中可以忽略不计。在总温差一定的条件下，从材料利用的经济性出发，导热系数小的材料应设置在内侧。读者可改变保温材料设置的顺序，重新计算，进行对比分析。案例操作详见 5.6.3 小节。

5.6.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5-58 所示。

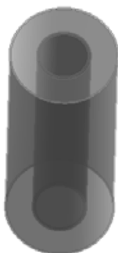


图 5-57 模型

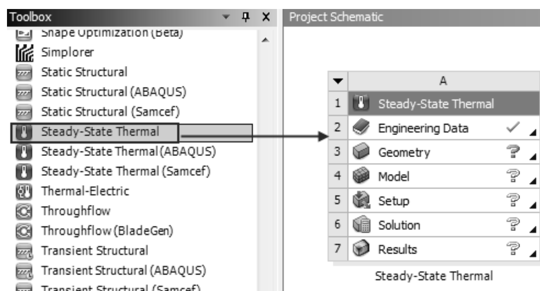


图 5-58 创建分析项目 A

5.6.4 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 5-59 所示。

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，单击 DM 窗口中 Tree Outline→XYPlane，再选择 Sketching 选项卡，选择 Draw→Rectangle，从坐标原点开始绘制一个矩形，然后依次再继续绘制两个矩形。

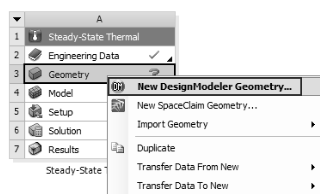


图 5-59　导入几何体

Step3：选择 Dimension→General，标注矩形的长和宽，如图 5-60 所示，宽度 H2=150/2=75mm，H4=159/2=79.5mm，H5=5mm，H6=80mm，H8=5mm，高度 V7=1000mm，如图 5-60 所示。

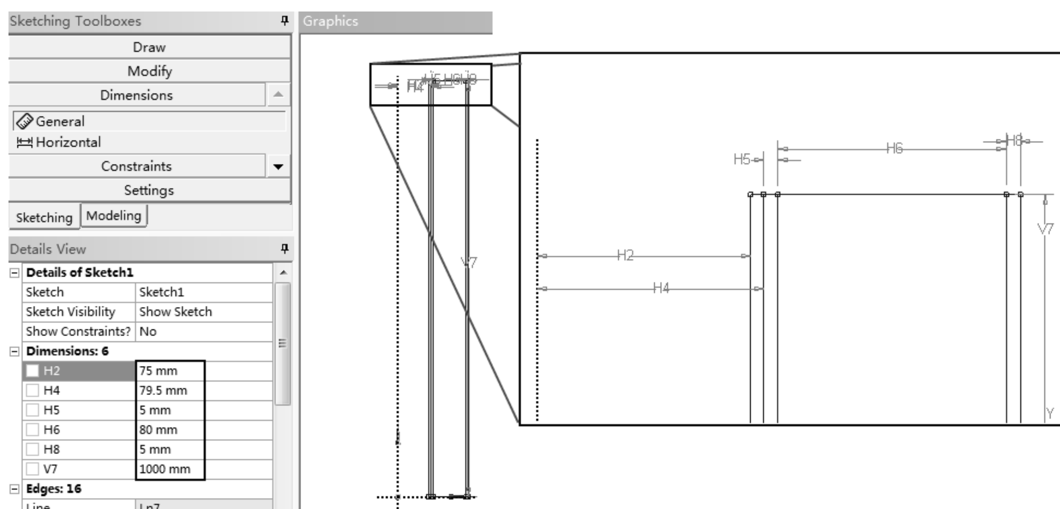


图 5-60　生成后的 DesignModeler 界面

Step4：切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Revolve（旋转）命令，在 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch1；在 Axis 栏中选中图 5-61 所示的坐标轴；在 Operation 栏中选择 Add Frozen；在 FD1,Angle（>0）栏中输入拉伸长度为 360°，其余默认即可，如图 5-61 所示。创建的几何模型如图 5-62 所示。

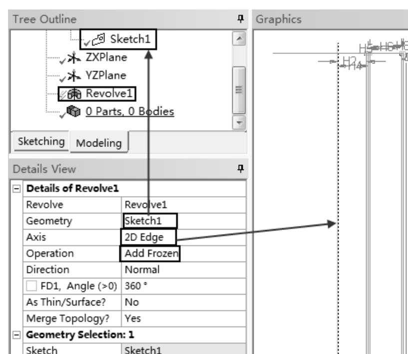


图 5-61　设置

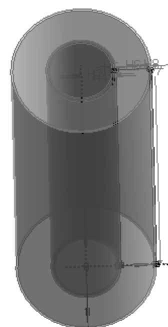


图 5-62　模型

注意：Frozen 为冻结后的几何体，显示的几何图形处于半透明状态。

Step5： 单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex2.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step6： 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

5.6.5 创建分析项目

Step1： 在 Workbench 主界面双击 A2：（Engineering Data），进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 5-63 所示。

Step2： 在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入 4 种材料的名称分别为 mat1、mat2、mat3 和 mat4，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat1 中，此时在 Properties of Outline Row 3：mat1 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 中输入 52，mat2 的导热系数为 0.07，mat3 的导热系数为 0.1，mat4 的导热系数为 0.14，在工具栏中单击 A2:Engineering Data ×中的 X 关闭材料设置窗口。

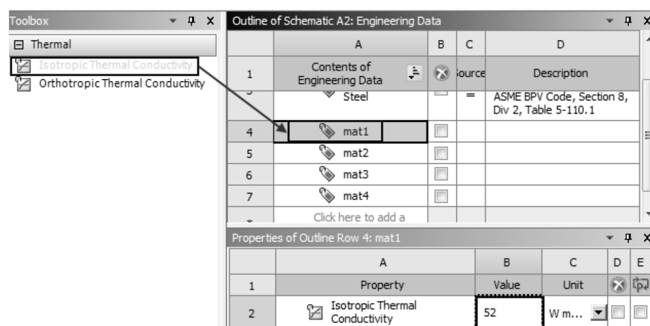


图 5-63　设置材料

Step3： 双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3 栏 Model 项，进入图 5-64 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

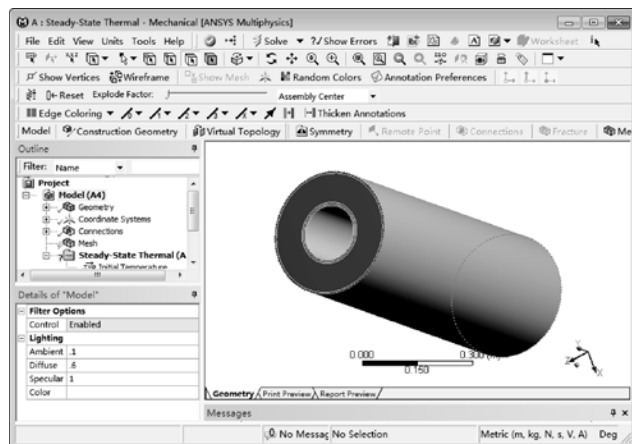


图 5-64　Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-65 所示。

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat1，选择即可将其添加到模型中去。

同样方法将第二个 Solid 的材料设置为 mat2，第三个 Solid 的材料设置为 mat3，第四个 Solid 的材料设置为 mat4。

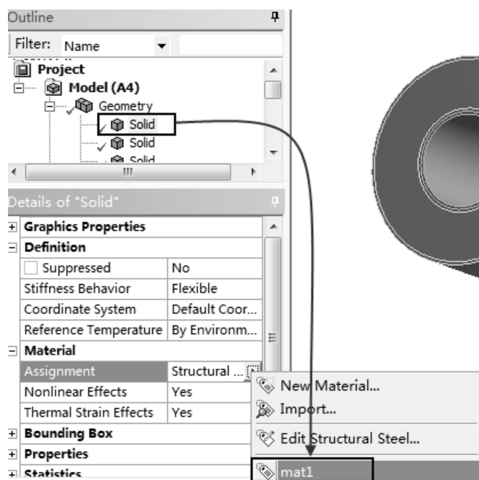


图 5-65　修改材料属性

5.6.6 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Face Meshing 命令，如图 5-66 所示。

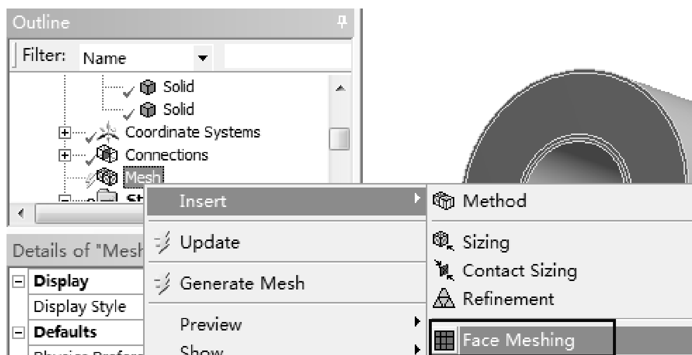


图 5-66　快捷菜单

Step2：在 Details of“Face Meshing”设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中图示上的三个小圆面，并单击 Apply 按钮，如图 5-67 所示；在 Internal Number of Divisions 栏中输入 3，其余默认即可。

进行与 Step2 相同的操作，在大圆面的 Internal Number of Divisions 栏中输入 6。



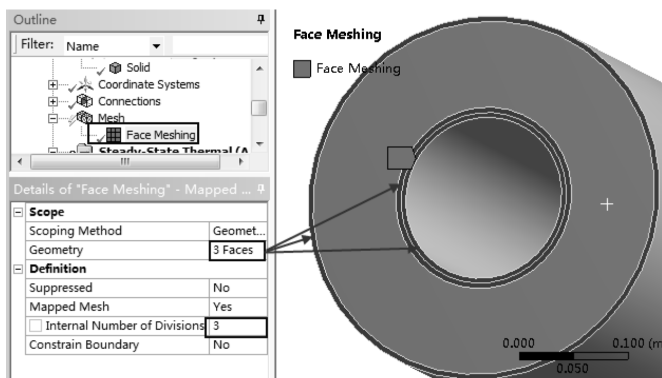


图 5–67　网格设置

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Mesh 选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5–68 所示。

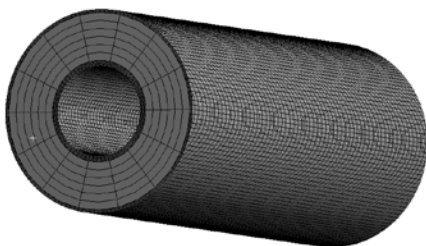


图 5–68　网格效果

5.6.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 5–69 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 5–70 所示。

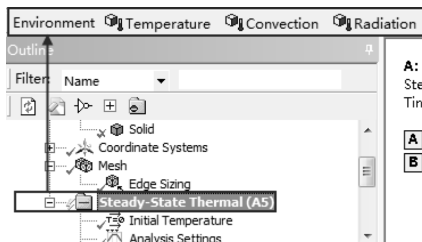


图 5–69　Environment 工具栏

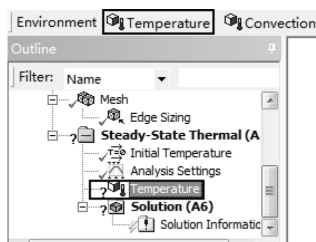


图 5–70　添加载荷

Step3：如图 5–71 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择圆筒壁内表面；在 Definition→Magnitude 栏中输入 175；其余默认即可，完成一个温度的添加。

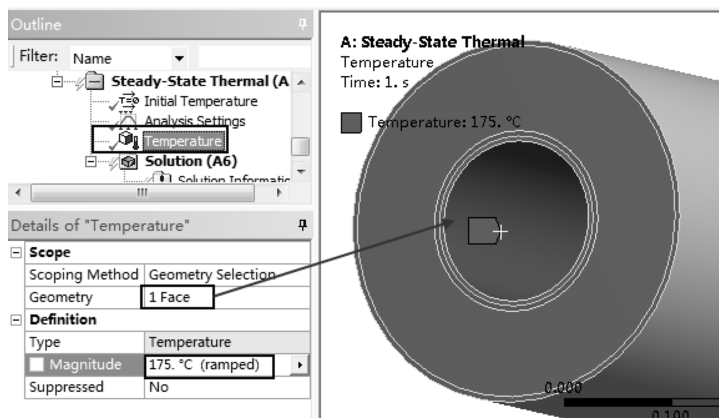


图 5-71 施加载荷（1）

Step4：如图 5-72 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature2”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择圆筒壁最外表面；在 Definition→Magnitude 栏中输入 50；其余默认即可，完成另一个温度的添加。

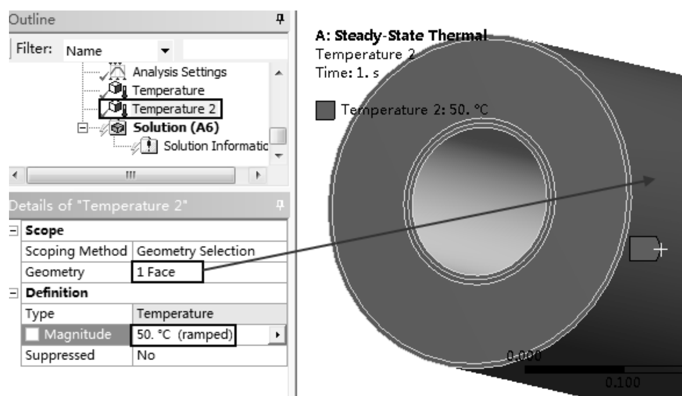


图 5-72 施加载荷（2）

Step5：在 Outlines（分析树）中选择 Steady-State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Solve 命令，如图 5-73 所示。

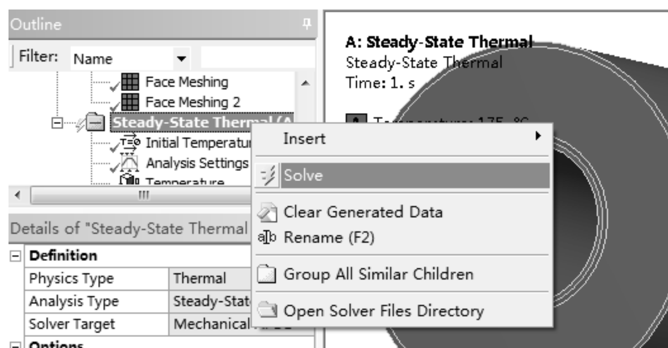


图 5-73 求解

5.6.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 5-74 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 5-75 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

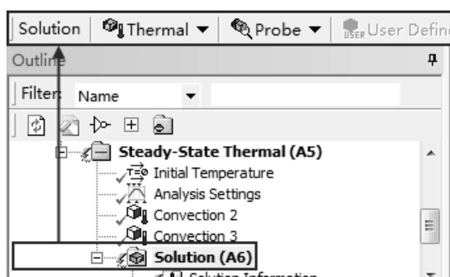


图 5-74 Solution 工具栏

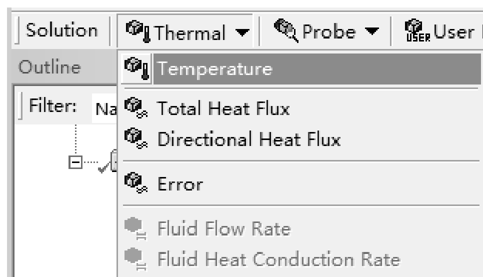


图 5-75 添加温度选项

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Solution（A6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Equivalent All Results 命令，如图 5-76 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 5-77 所示。

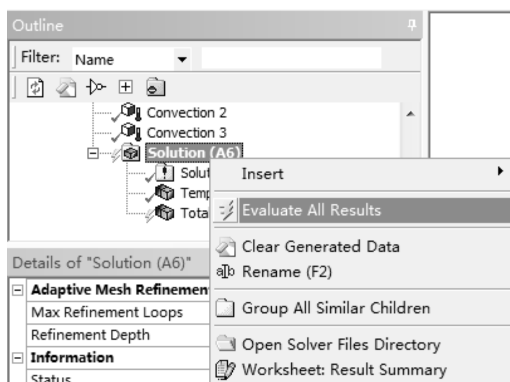


图 5-76 快捷菜单

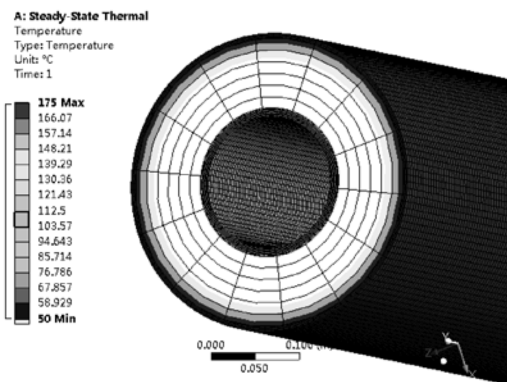


图 5-77 温度分布

Step5：单击 Solution 选项，然后选择 mat2、mat3、mat4 材料的几何体，并单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide Body（F9）命令，如图 5-78 所示，则 mat2、mat3、mat4 几何将被隐藏，如图 5-79 所示。

Step6：如图 5-80 所示，单击工具栏中的面选择工具，然后选择当前状态下 X 轴坐标最大位置处的面，然后选择 Thermal→Total Heat Flux 命令。

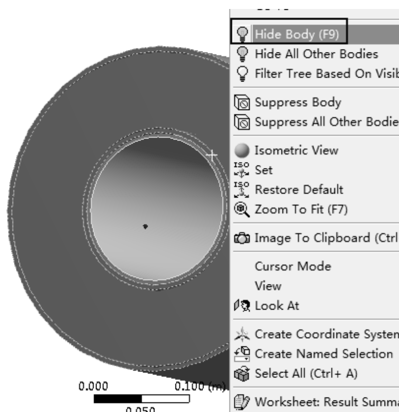


图 5-78 快捷菜单

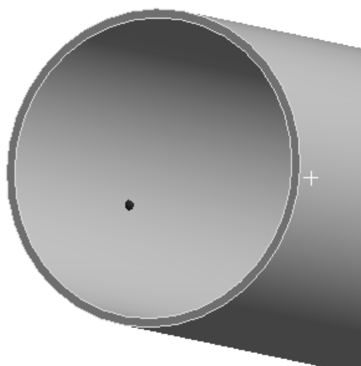


图 5-79 几何被隐藏

Step7： 管道的热流密度如图 5-81 所示。

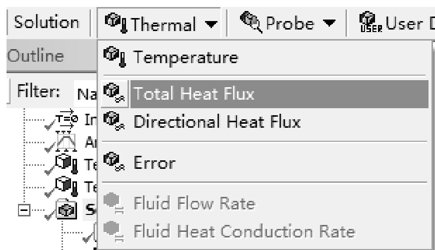


图 5-80 菜单

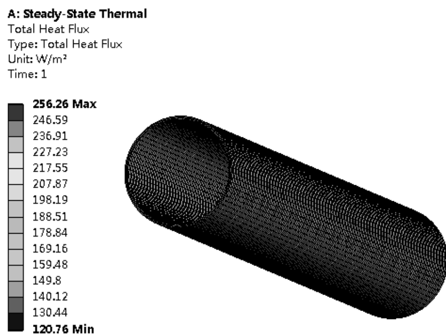


图 5-81 热流分布

5.6.9 保存与退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3： 单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

5.7 稳态导热案例四——复合层圆筒壁导热 2

本节将通过一个简单的案例介绍复合层圆筒壁结构稳态导热过程的解析计算方法及数值仿真计算的操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中单层平壁结构的建模方法及求解过程，同时掌握单层平壁导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter5\char05−4\ex4.wbpj

5.7.1 问题描述

本实例为一直径为 0.2m 的蒸汽管道，如图 5−82 所示，厚度 8mm；管外包有隔热保温层，厚度为 0.12m。已知，管材的导热系数 $\lambda_1 = 45\ \mathrm{W/(m \cdot K)}$，隔热保温材料的导热系数 $\lambda_2 = 0.10\ \mathrm{W/(m \cdot K)}$。给定第三类边界条件：管内蒸汽温度 $t_{f1} = 300℃$，管内蒸管壁面之间对流换热的表面传热系数 $h_1 = 120\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$；周围空气温度 $t_{f2} = 25℃$，保温层外表面与空气之间的表面传热系数 $h_2 = 10\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$。求单位管长的传热系数和隔热保温层外表面的温度。

5.7.2 解析方法计算

【解】 根据给出的几何尺寸得到：

$$d_1 = 0.2\,\mathrm{m}$$

$$d_2 = 0.2 + 2 \times 0.008 = 0.216\,\mathrm{m}$$

$$d_3 = 0.216 + 2 \times 0.12 = 0.456\,\mathrm{m}$$

$$k_l = \frac{\pi}{\dfrac{1}{h_1 d_1} + \dfrac{1}{2\lambda_1}\ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{2\lambda_2}\ln\dfrac{d_3}{d_2} + \dfrac{1}{h_2 d_3}}$$

$$= \frac{\pi}{\dfrac{1}{120 \times 0.2} + \dfrac{1}{2 \times 45}\ln\dfrac{0.216}{0.2} + \dfrac{1}{2 \times 0.1}\ln\dfrac{0.456}{0.216} + \dfrac{1}{10 \times 0.456}}$$

$$= \frac{\pi}{\dfrac{1}{24} + \dfrac{1}{90}\ln\dfrac{0.216}{0.2} + \dfrac{1}{0.2}\ln\dfrac{0.456}{0.216} + \dfrac{1}{4.56}} = 0.7858\mathrm{W/(m \cdot K)}$$

$$q_l = k_l(t_{f1} - t_{f2}) = 0.7858 \times (300 - 25) = 216.095\mathrm{W/m}$$

$$t_{w2} = t_{f2} + q_l \frac{1}{h_2 \pi d_3} = 25 + 216.095 \times \frac{1}{10 \times 3.14 \times 0.456}$$

$$= 40.092℃$$

【讨论】 保温层外侧温度不得超过 50℃。若计算结果超过 50℃，应重新设计保温层厚度，重复设计计算，一直到符合规定为止。

5.7.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady−State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5−83 所示。

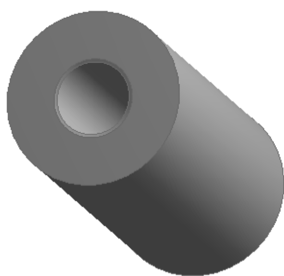


图 5-82 模型

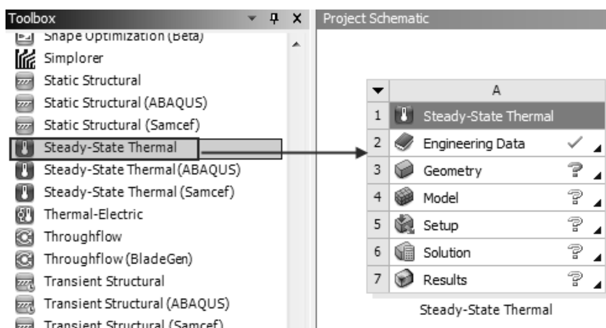


图 5-83 创建分析项目 A

5.7.4 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 5-84 所示。

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，单击 DM 窗口中的 Tree Outline→XYPlane，再选择 Sketching 选项卡，选择 Draw→Circle，从坐标原点开始绘制两个同心圆。

Step3：选择 Dimension→Diameter，标注两个圆的直径，如图 5-85 所示，D1=200mm，D2=184mm。

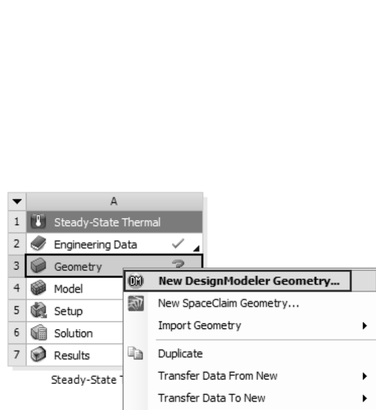


图 5-84 导入几何体

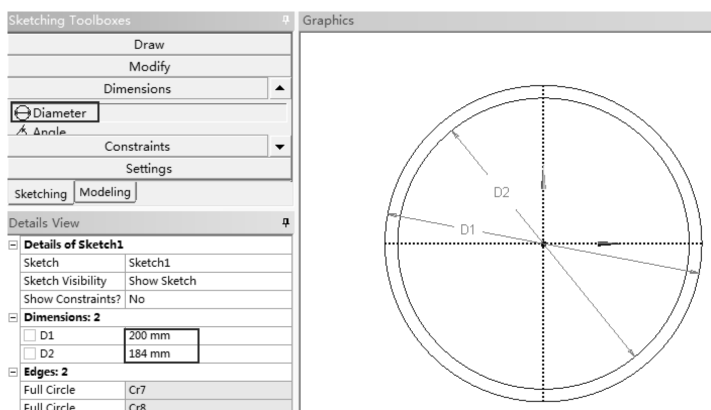


图 5-85 生成后的 DesignModeler 界面

Step4：切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Extrude（拉伸）命令，在 Details View 设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch1；在 Operation 栏中选择 Add Frozen；在 FD1,Depth（>0）栏中输入拉伸长度为 1000，如图 5-86 所示，其余默认即可。

注意：Frozen 为冻结后的几何体，显示的几何图形处于半透明状态。

进行与 Step3 相同的操作，在圆柱外面继续绘制一个圆柱，圆柱的外径为 440mm，如图 5-87 所示。

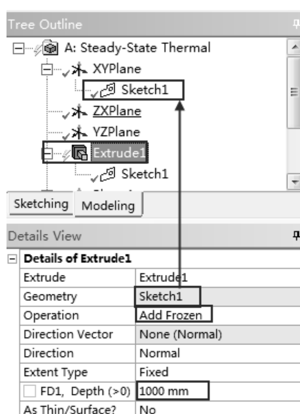


图 5-86　设置 1

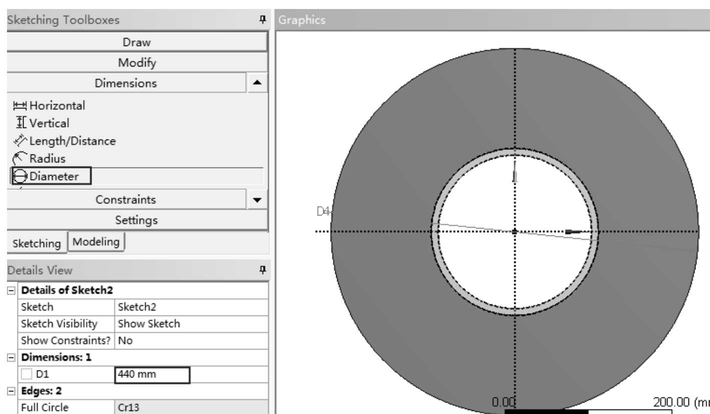


图 5-87　模型 1

Step5：切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Extrude（拉伸）命令，在 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch2；在 FD1,Depth（>0）栏中输入拉伸长度为 1000，如图 5-88 所示，其余默认即可。

生成的几何模型如图 5-89 所示。

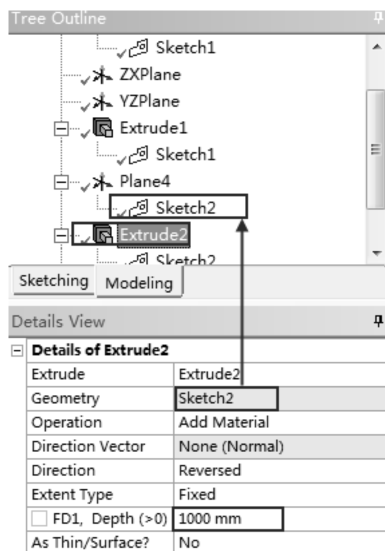


图 5-88　设置 2

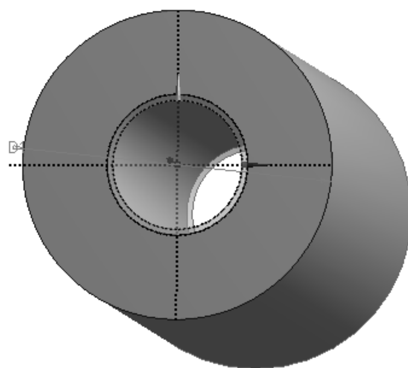


图 5-89　模型 2

Step6：单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex4.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step7：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

5.7.5 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 5-90 所示。

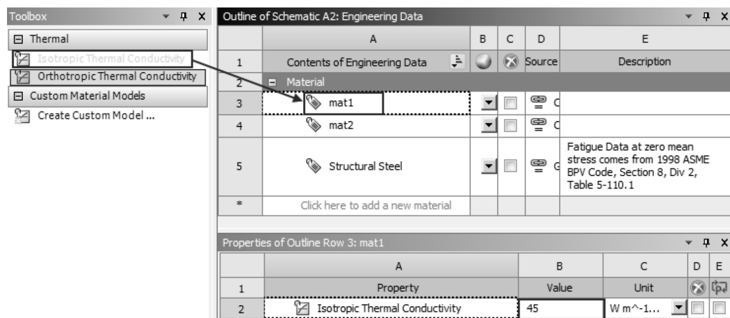


图 5-90　设置材料

Step2：在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入两种材料的名称分别为 mat1 和 mat2，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat1 中，此时在 Properties of Outline Row 3：mat1 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 中输入 45，mat2 的导热系数为 0.1，在工具栏中单击 A2:Engineering Data ×中的×关闭材料设置窗口。

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 5-91 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

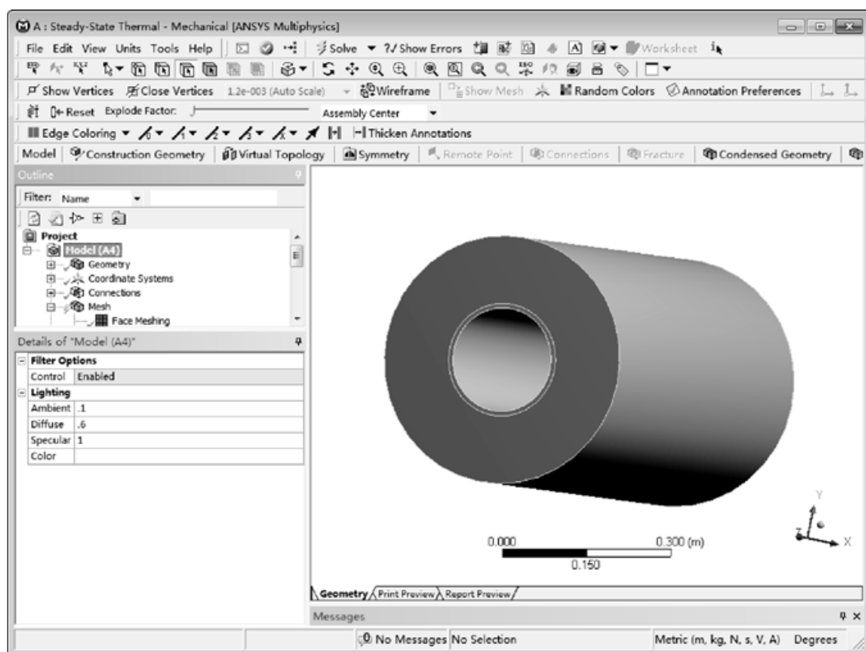


图 5-91　Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-92 所示。

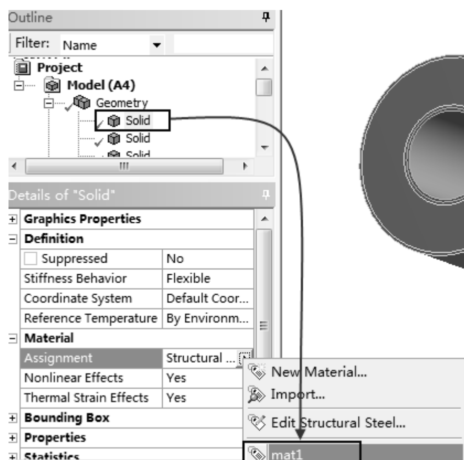


图 5-92　修改材料属性

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat1，选择即可将其添加到模型中去。

同样方法将第二个 solid 的材料设置为 mat2。

5.7.6 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Face Meshing 命令，如图 5-93 所示。

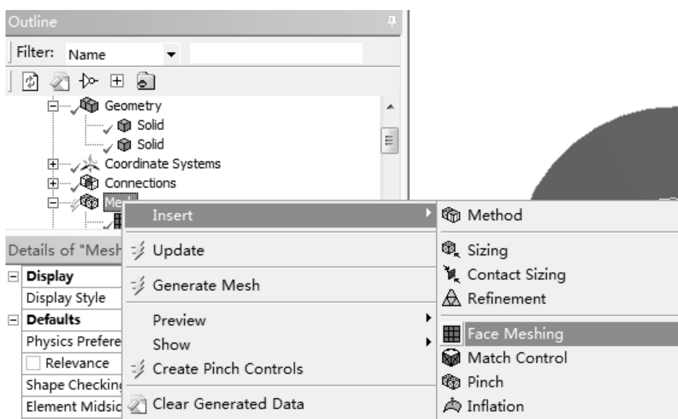


图 5-93　快捷菜单

Step2：在 Details of“Face Meshing”设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中图示上的最内侧小圆面，并单击 Apply 按钮，如图 5-94 所示；在 Internal Number of Divisions 栏中输入 3，其余默认即可。

重复同样的操作，在大圆面的 Internal Number of Divisions 栏中输入 10。

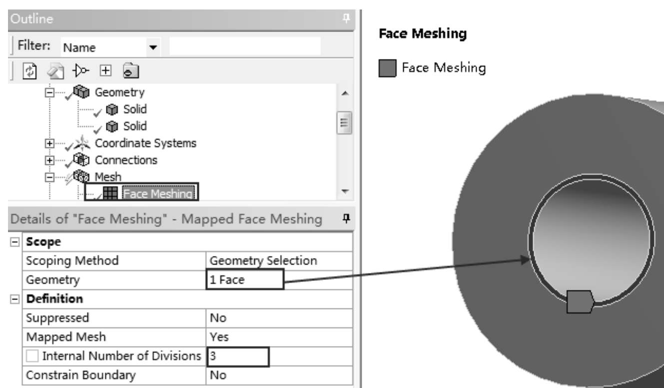


图 5-94　网格设置

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5-95 所示。

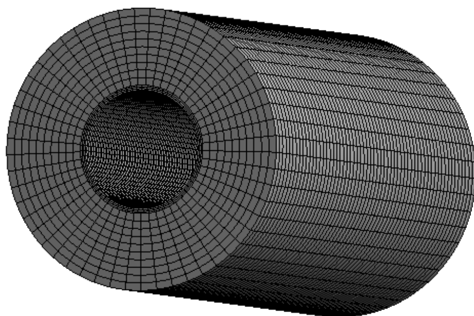


图 5-95　网格效果

5.7.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 5-96 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Convection（对流）命令，此时在分析树中会出现 Convection 选项，如图 5-97 所示。

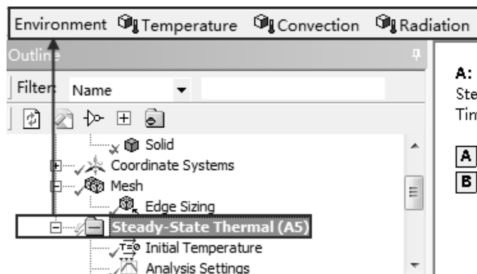


图 5-96　Environment 工具栏

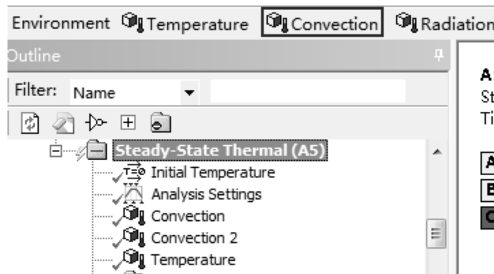


图 5-97　添加载荷

Step3：如图 5−98 所示，选中 Convection，在 Details of“Convection”中作如下操作：在 Definition→Film Coefficient 栏中输入 120；在 Ambient Temperature 栏中输入 300；其余默认即可，完成一个温度的添加。

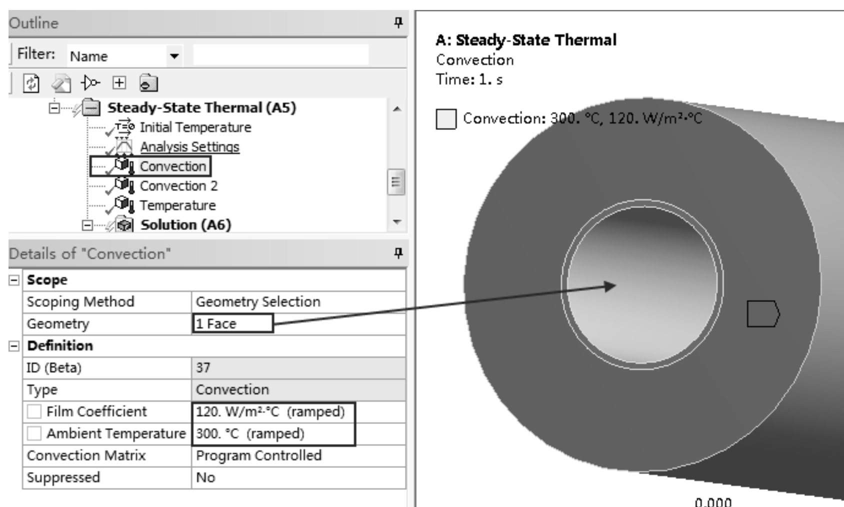


图 5−98　施加载荷

Step4：如图 5−99 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature2”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择圆筒壁最外表面；在 Definition→Film Coefficient 栏中输入 10；在 Ambient Temperature 栏中输入 25；其余默认即可，完成另一个温度的添加。

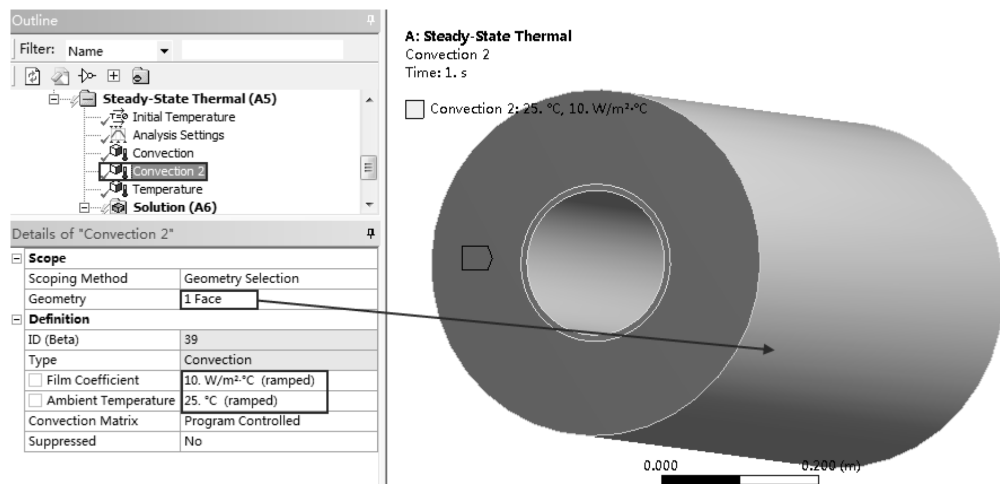


图 5−99　再次施加载荷

Step5：如图 5−100 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择圆筒壁最内表面；在 Definition→Magnitude 栏中输入 300；其余默认即可，完成另一个温度的添加。

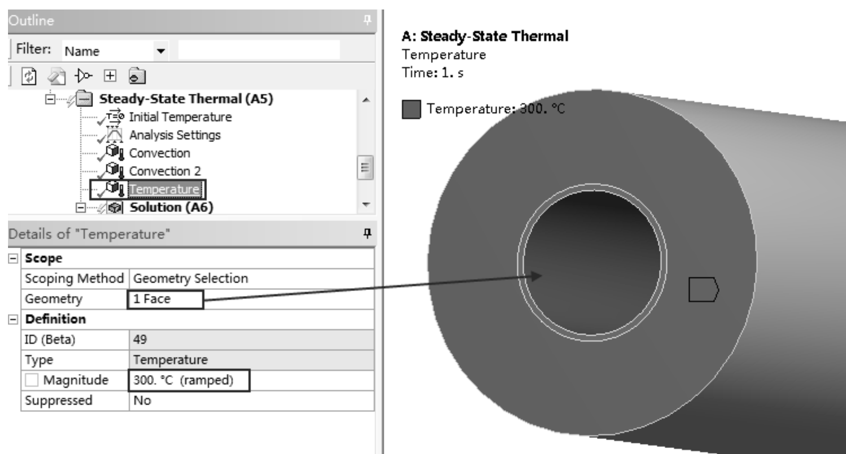


图 5-100 施加载荷

Step6：在 Outlines（分析树）中选择 Steady-State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 5-101 所示。

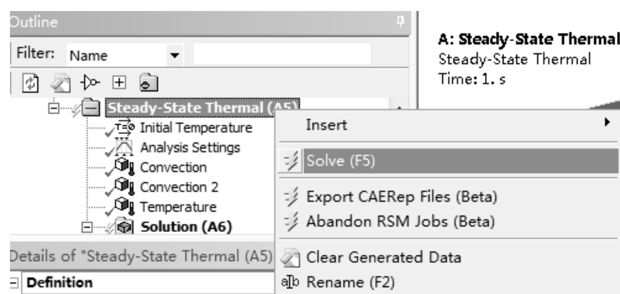


图 5-101 求解

5.7.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 5-102 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 5-103 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

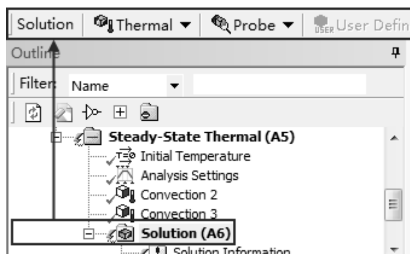


图 5-102 Solution 工具栏

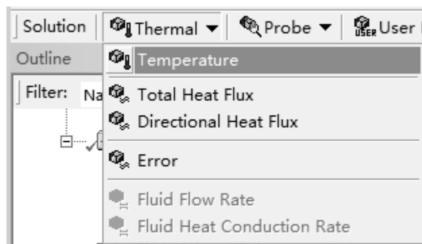


图 5-103 添加温度选项

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Solution（A6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 5-104 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 5-105 所示。

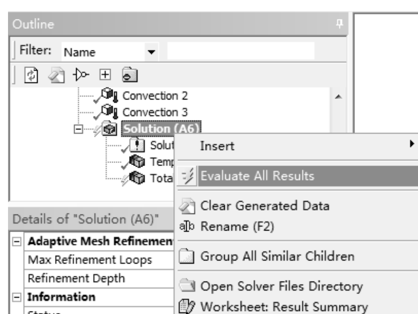


图 5-104 快捷菜单

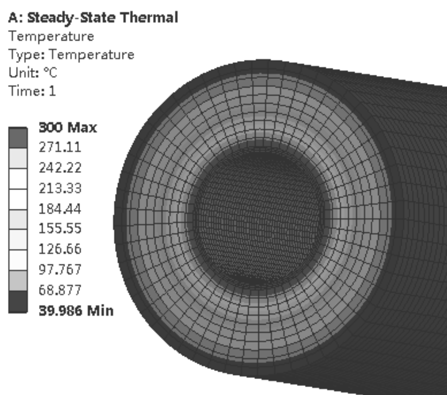


图 5-105 温度分布

Step5：如图 5-106 所示，单击工具栏中的面选择工具，选择当前状态下 X 轴坐标最大位置处的面，然后选择 Thermal→Total Heat Flux 命令。

Step6：管道的热流密度如图 5-107 所示。

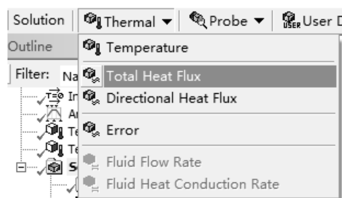


图 5-106 菜单

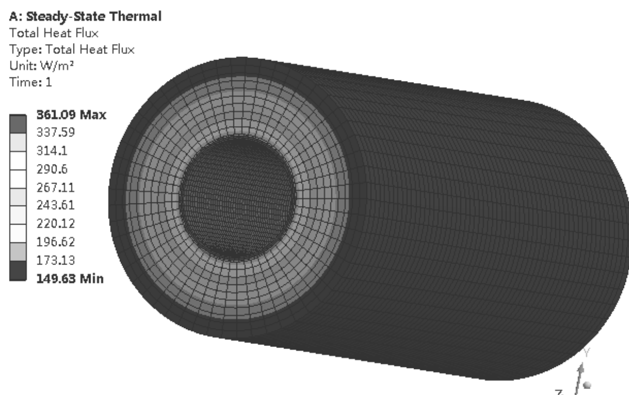


图 5-107 热流分布

5.7.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3： 单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

【分析】 解析解与仿真解的温度结果分别为 40.092 和 39.986。

从上述分析可以看出，仿真结果与解析方法算出的结果一致。

5.8 稳态热分析案例五——各向异性结构导热

本节主要介绍通过 ANSYS Workbench 平台实现各向异性材料稳态导热过程的边界条件设置与求解方法。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中各向异性结构的建模方法及求解过程，同时掌握各向异性导热的解析计算方法。

模型文件	网盘\Chapter5\char05−5\com_part.stp
结果文件	网盘\Chapter5\char05−5\non_thermal.wbpj

5.8.1 案例介绍

假设有个四层的石墨环氧反对称角铺层，其几何参数为 $a=b=0.08\text{m}$ ，$h=0.008\text{m}$ ，如图 5−108 所示，外加热流垂直作用在层合板上表面中心区域，热流作用面积为 10^{-4}m^2 ，$q=-1.0\times10\text{W/m}^2$ ，热流温度为 500℃。材料参数分别为：$\lambda_x=30\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 、$\lambda_y=20\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 、$\lambda_z=10\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ，对流换热系数为 $h=30\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ，比热容 $c=1000\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ ，试求其热分布。

5.8.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady−State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5−109 所示。

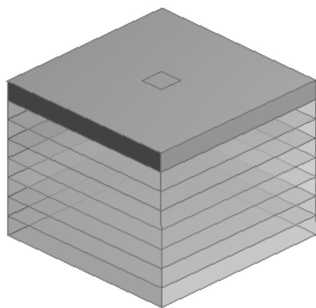


图 5−108 模型

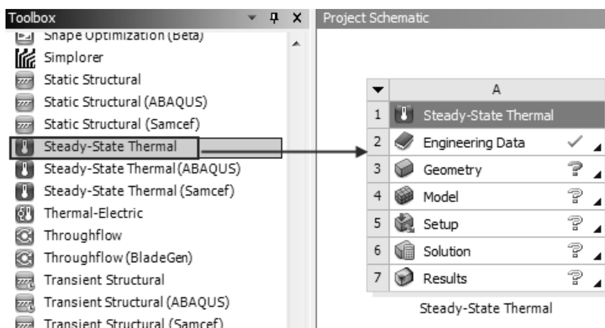


图 5−109 创建分析项目 A



5.8.3 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 5-110 所示。

Step2：在弹出的图 5-111 所示的“打开”对话框中选择 com_part.stp 格式的几何文件，并单击“打开”按钮。

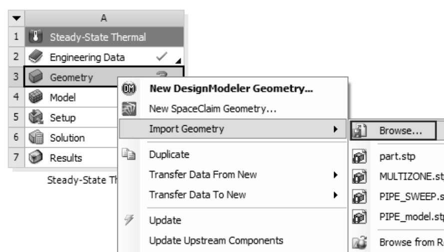


图 5-110 导入几何体

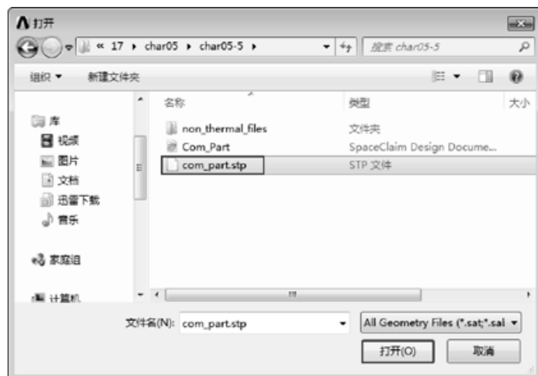


图 5-111 导入几何体

Step3：双击 A3：Geometry 项进入图 5-112 所示的几何建模平台，对几何进行操作。

Step4：单击工具栏中的 Generate 命令，生成图 5-113 所示的几何实体。

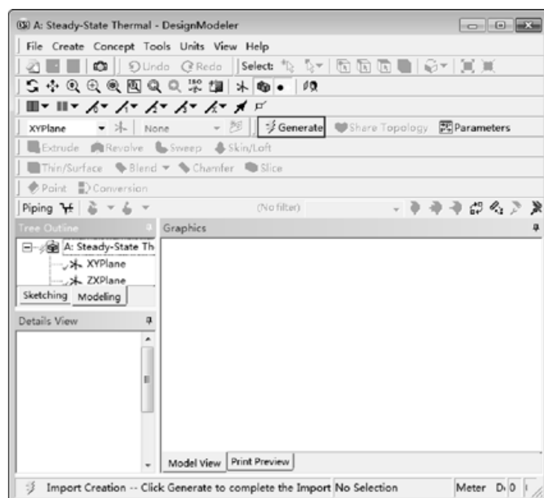


图 5-112 DM 界面

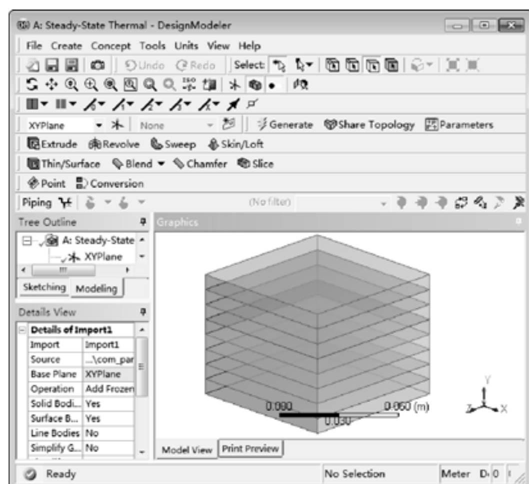


图 5-113 DM 界面中的几何

在 Tree Outline 模型树中选中 8 个 Solid 中的第一个（此时最上面的实体被加亮），然后选择菜单中的 Tools→Unfreeze（解冻）命令，如图 5-114 所示。

在 Tree Outline 模型树中单击 Unfreeze（解冻）命令，在图 5-115 所示的 Details View 设置窗口中的 Bodies 栏中保证加亮的几何被选中，此时将显示 1，表示一个几何被选中，单击工具栏中的 Generate 命令，此时最上面的几何体由半透明状态变成了实体状态。

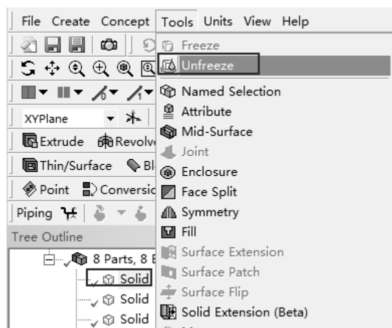


图 5-114 菜单

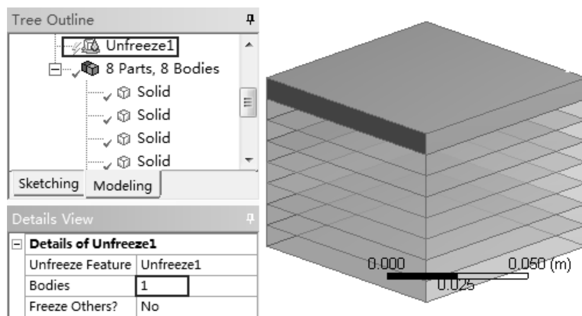


图 5-115 几何解冻

单击工具栏中的按钮，将鼠标点选切换成面选择，然后单击解冻实体的上平面，如图 5-116 所示，然后单击工具栏中的按钮，将选中平面平行于桌面。

单击 Sketching 选项卡，在平面上绘制图 5-117 所示的小正方形，然后标注尺寸，正方形的两个边长都是 0.01m，距离两侧边的距离都是 0.035m。

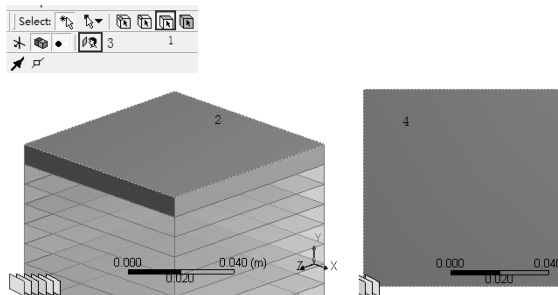


图 5-116 单击上平面

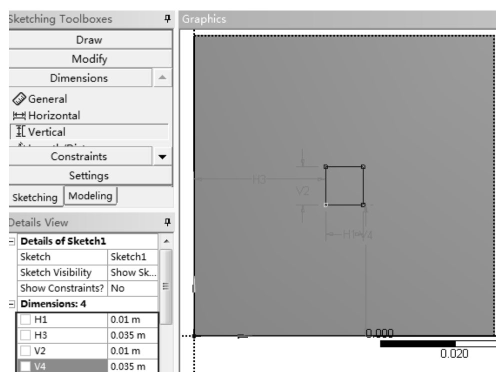


图 5-117 绘制小正方形并标注

选择工具栏中的 Extrude 按钮，在 Details View 设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中确保刚才绘制的小正方形草绘被选中；在 Operation 栏中选择 Imprint Face 选项，单击工具栏中的 Generate 命令，如图 5-118 所示。

此时小正方形将生成一个小平面，这个小平面就是后面分析时施加温度荷载的位置，用鼠标单击即可选中此小平面，如图 5-119 所示。

Step5： 单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 non_thermal.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step6： 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

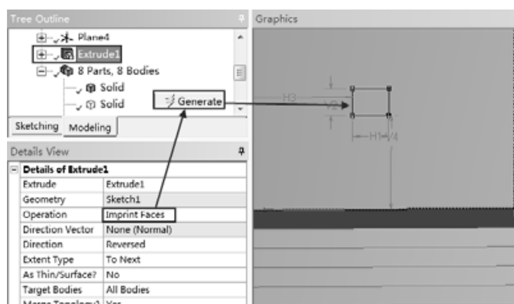


图 5-118　菜单

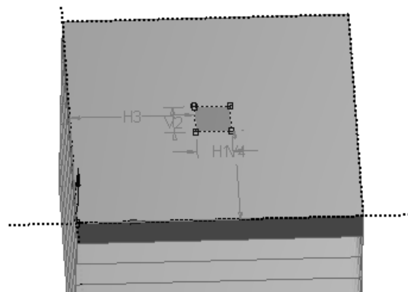


图 5-119　几何解冻

5.8.4 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 5-120 所示。

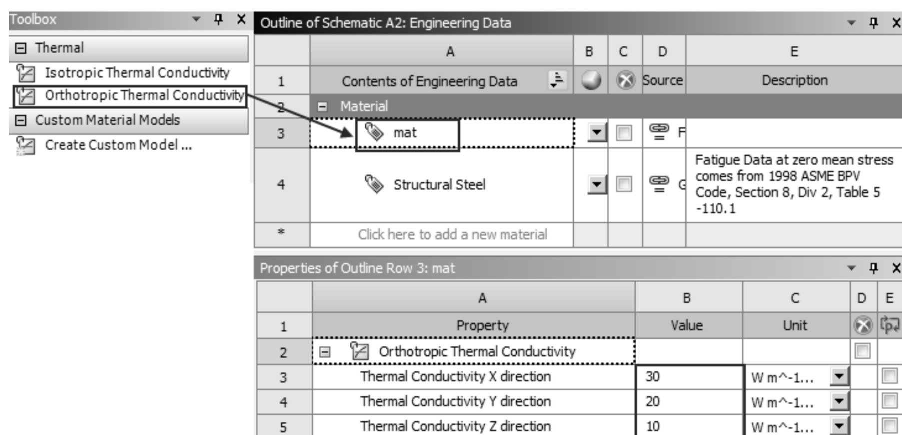


图 5-120　设置材料

Step2：在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Orthotropic Thermal Conductivity（各向异性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时在 Properties of Outline Row 3：mat 下面的 Orthotropic Thermal Conductivity 中输入 X 方向为 30、Y 方向为 20、Z 方向为 10，在工具栏中单击 A2:Engineering Data × 中的 关闭材料设置窗口。

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 5-121 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step4：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中，选择 Geometry 选项下的编号为奇数的 Solid，此时即可在 Details of“Multiple Selection”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-122 所示。

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的 ，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中。

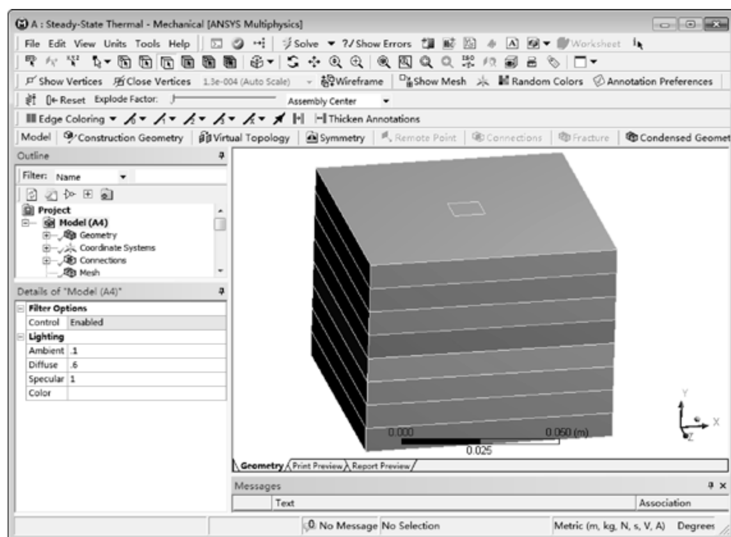


图 5-121 Mechanical 界面

单击工具栏中的 按钮创建新坐标系，并将 Principle Axis 中的 Axis 设置为 Z，如图 5-123 所示。

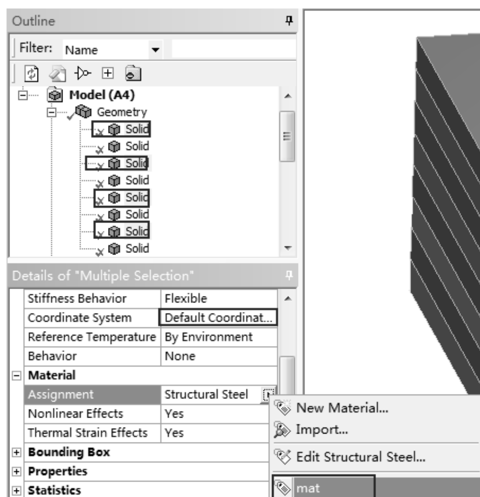


图 5-122 修改材料属性

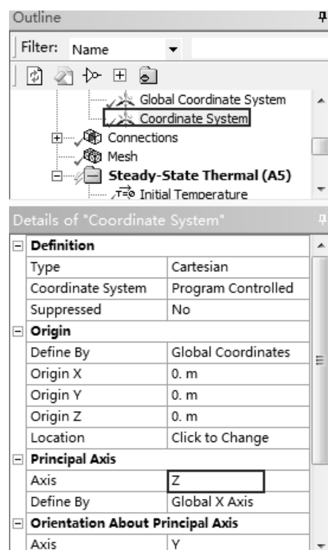


图 5-123 自定义坐标系

Step6：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中，选择 Geometry 选项下的编号为偶数的 Solid，此时即可在 Details of“Multiple Selection”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-124 所示。

Step7：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的 ，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中。

在 Coordinate System 栏中选择刚刚建立的 Coordinate System 坐标系。



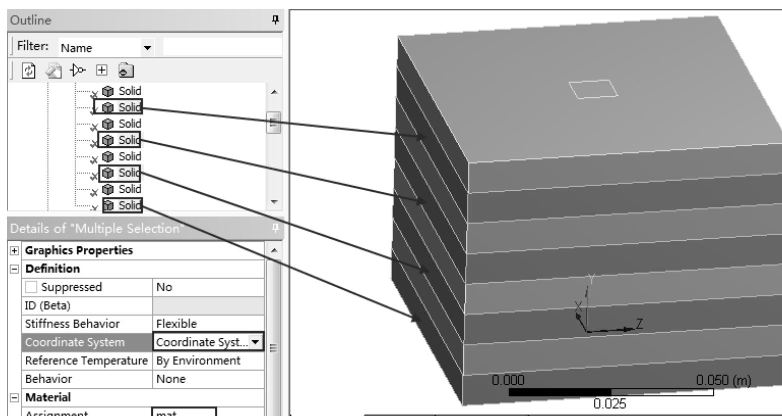


图 5-124　添加材料

5.8.5 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在图 5-125 所示 Details of “Mesh”设置面板中，在 Element Size 栏中输入 2.e-003m。

Step2：在 Outlines（分析树）中选择 Mesh 选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5-126 所示。

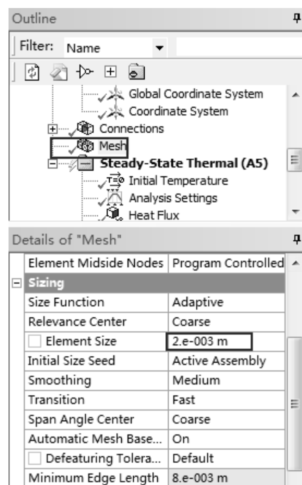


图 5-125　网格设置

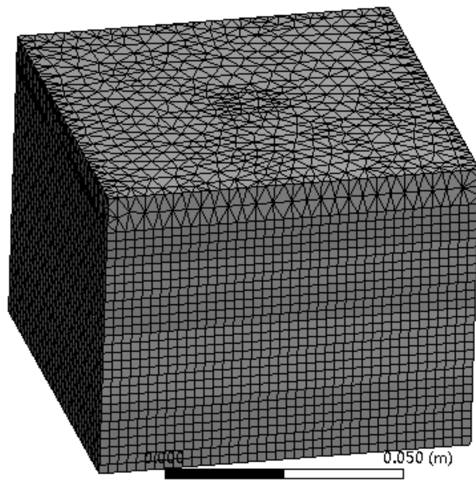


图 5-126　网格效果

5.8.6 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 5-127 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Convection（对流）命令，此时在分析树中会出现 Convection 选项，如图 5-128 所示。

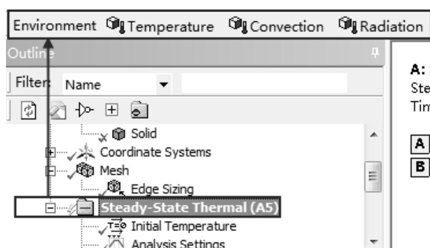


图 5-127 Environment 工具栏

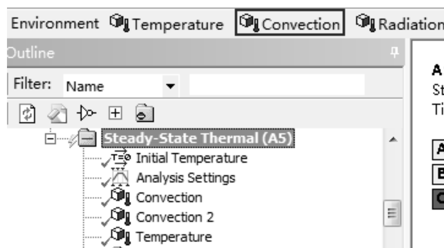


图 5-128 添加载荷

Step3：如图 5-129 所示，选中 Convection，在 Details of“Convection”中作如下操作：在 Geometry 中选择几何体所有侧面的表面；在 Definition→Film Coefficient 栏中输入 30；在 Ambient Temperature 栏中输入 2.2；其余默认即可，完成一个温度的添加。

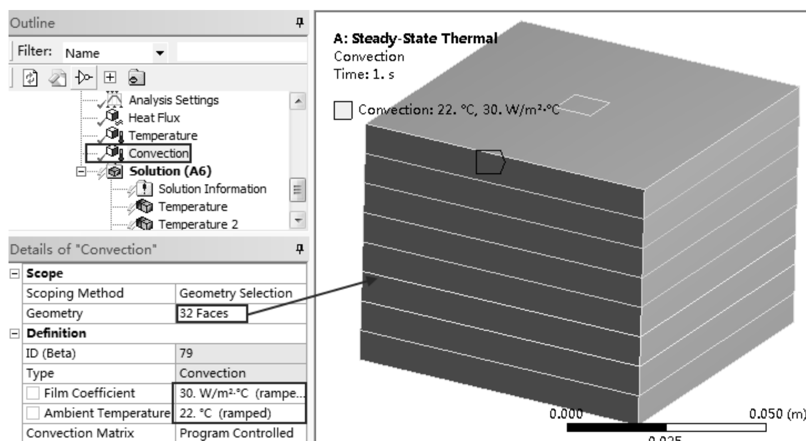


图 5-129 添加温度

Step4：如图 5-130 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择上方的小正方形平面；在 Definition→Magnitude 栏中输入 500；其余默认即可，完成另一个温度的添加。

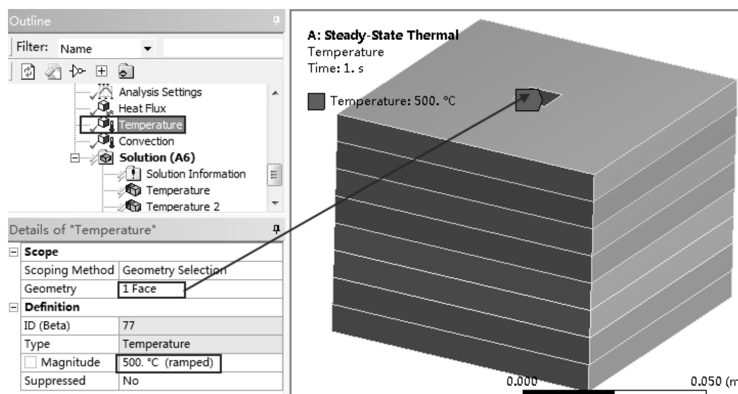


图 5-130 添加另一个温度

Step5：如图 5−131 所示，选中 Heat Flux，在 Details of“Heat Flux”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择上方的小正方形平面；在 Definition→Magnitude 栏中输入 10；其余默认即可，完成另一个温度的添加。

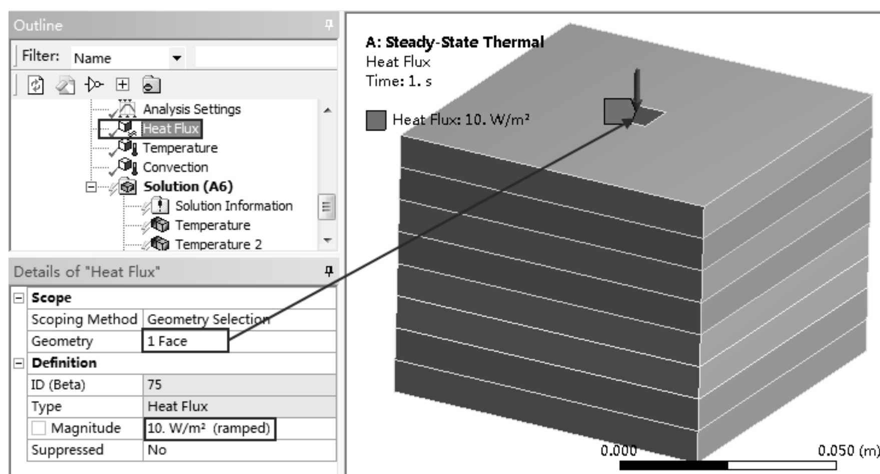


图 5−131　继续添加温度

Step6：在 Outlines（分析树）中选择 Steady−State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 5−132 所示。

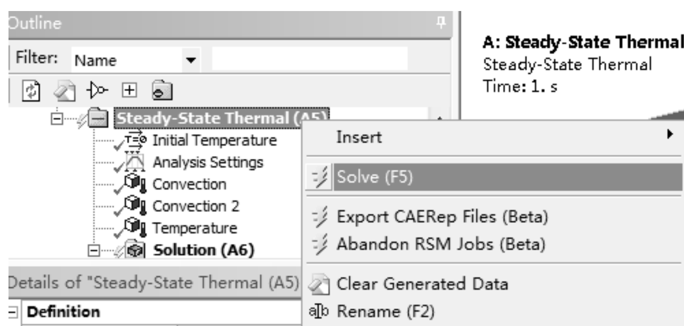


图 5−132　求解

5.8.7 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 5−133 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 5−134 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

Step3：在 Outlines（分析树）中选择 Solution（A6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 5−135 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

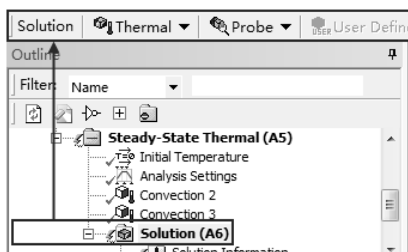


图 5-133　Solution 工具栏

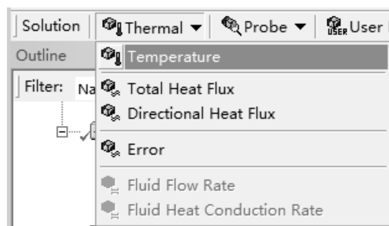


图 5-134　添加温度选项

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 5-136 所示。

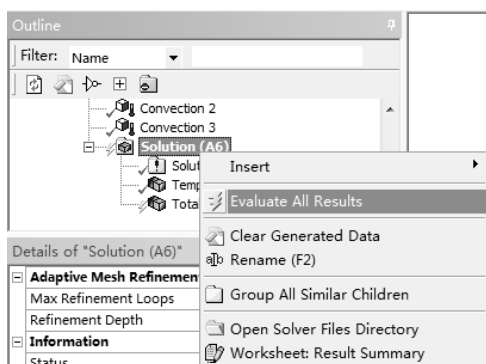


图 5-135　快捷菜单

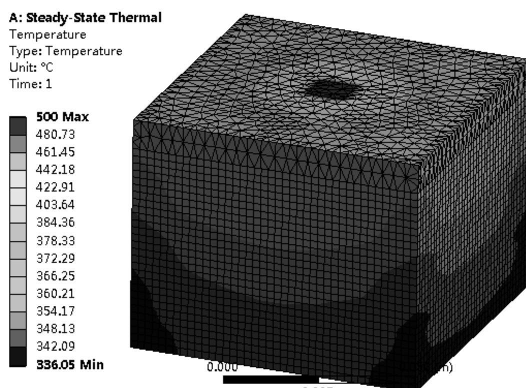


图 5-136　温度分布

Step5：重复同样的操作，图 5-137 为仅显示奇数个 Solid 的温度分布云图。

Step6：图 5-138 为仅显示偶数个 Solid 的温度分布云图。

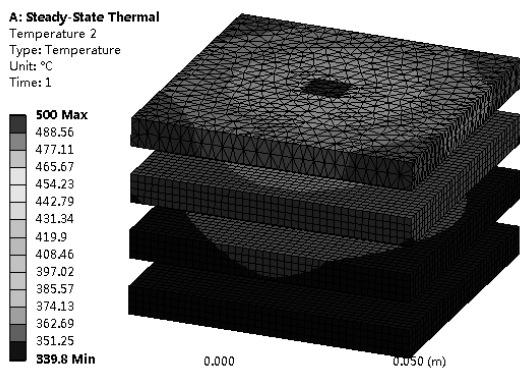


图 5-137　奇数 Solid 云图

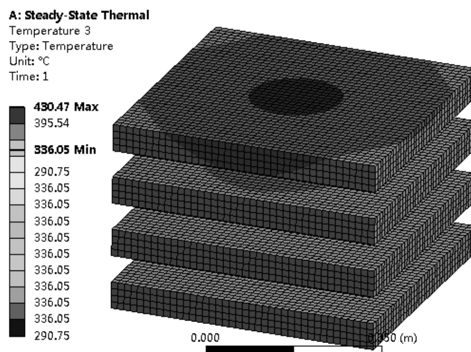


图 5-138　偶数 Solid 云图

Step7：如图 5-139 所示，单击工具栏中的面选择工具，然后选择当前状态下 X 轴坐标最大位置处的面，然后选择 Thermal→Total Heat Flux 命令。

Step8：管道的热流密度如图 5-140 所示。

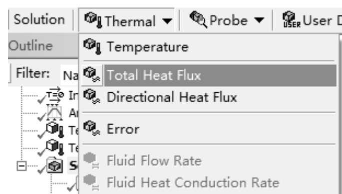


图 5-139　菜单

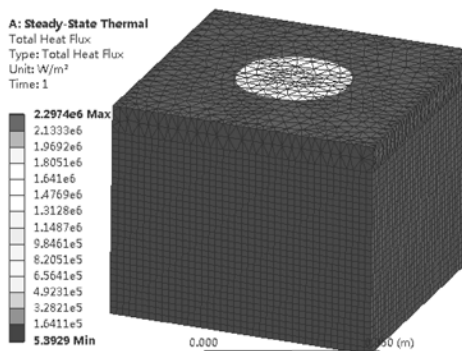


图 5-140　热流率

5.8.8 保存与退出

Step1：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step2：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

5.9　本章小结

本章首先对稳态传热理论及基本公式进行了简单的介绍，然后分别以板和圆柱为例对不同情况的传热解析计算方法与仿真计算方法进行了详细的介绍，并对比了两种计算方法的计算结果。



第 6 章　非稳态导热分析

在自然界和工程中，很多导热过程是非稳态的，即温度场是随时间而变化的。例如，室外空气温度和太阳辐射的周期变化引起房屋维护结构（墙壁、屋顶等）温度场随时间变化；采暖设备间歇供暖时引起墙内外温度随时间变化，这些都是非稳态导热过程。

按照过程进行的特点，非稳态导热过程可以分为周期性非稳态导热过程和瞬态非稳态导热过程两大类。在周期性非稳态导热过程中，物体的温度按照一定的周期发生变化。例如，以 24h 为周期，或以 8760h（即一年）为周期。温度的周期性变化使物体传递的热流密度也表现出周期性变化的特点。

在瞬态导热过程中，物体的温度随时间不断地升高（加热过程）或降低（冷却过程），在经历相当长的时间之后，物体的温度逐渐趋近于周围介质的温度，最终达到热平衡。本章将分别对两类非稳态导热过程进行分析和阐述。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
非稳态热分析理论	√	√		
非稳态热有限元分析操作方法		√	√	√
非传热的基本应用		√	√	√

6.1　非稳态导热的基本概念

首先分析瞬态导热过程。以采暖房屋外墙为例来分析墙内温度场的变化。假定采暖设备开始供热前，墙内温度场是稳态的，温度分布的情形如图 6−1a 所示，室内空气温度为 t'_{f1}，墙内表面温度为 t'_{w1}，墙外表面温度为 t'_{w2}，室外空气温度为 t_{f2}。

当采暖设备开始供热时，室内空气很快上升到 t''_{f1} 并保持稳定。由于室内空气温度的升高，它和墙内表面之间的对流换热热流密度增大，墙壁温度也随之升高如图 6−1b 所示。

开始时 t_{w1} 升高的幅度较大，依次地 t_a、t_b、t_c 和 t_{w2} 升高的幅度较小，而在短时间内 t_{w2} 几乎不发生变化。随着时间的推移，各层温度将逐渐地按不同幅度升高。t_{f2} 是室外空气温度，假定在此过程中保持不变。

关于热流密度的变化，一开始由于墙内表面温度不断地升高，室内空气与它之间的对流换热系数密度 q_1 会不断减小；而墙外表面与室外空气之间的对流换热密度 q_2 却因墙外表面温度随时间不断升高而逐渐增大，如图 6−1c 所示。与此同时，通过墙内各层的热流密度 q_a、q_b 和 q_c 也将随时间发生变化，并且彼此各不相等。

在经历一段相当长时间之后，墙内温度分布趋于稳定，建立起新的稳态温度分布，即图 6−1a 中的 $t''_{f1}-t''_{w1}-t''_{w2}-t_{f2}$。当室内尚未开始供热之前，墙内和室内外空气温度是稳态

的，所以 q_1 等于 q_2，而且等于通过墙的传热量 q'。

在两个稳态之间的变化过程中，热流密度 q_1 和 q_2 是不相等的，它们的差值（即图 6−1c 中的阴影面积）为墙本身温度的升高提供了热量。所以，瞬态导热过程必定伴随着物体的加热或冷却过程。

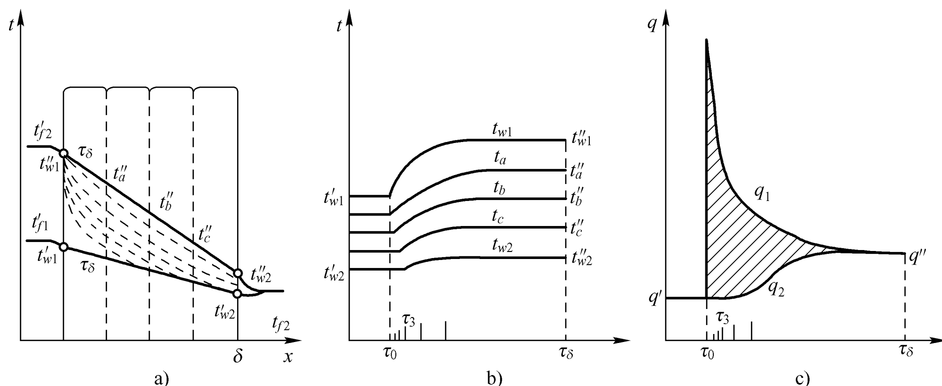


图 6−1　瞬态导热的基本概念

综上所述，在物体的加热或冷却过程中，温度分布的变化可以划分为三个基本阶段。第一阶段是过程开始的一段时间，它的特点是温度变化从边界面（如上述案例中墙内表面 t'_{w1}），逐渐地深入到物体内部，此时物体内各处温度随时间的变化率是不一样的，温度分布受初始温度分布的影响很大，这一阶段称为不规则情况阶段。

随着时间的推移，初始温度分布的影响逐渐消失，进入第二阶段，此时物体内各处温度随时间的变化率具有一定的规律，称为正常情况阶段。物体加热和冷却的第三阶段就是建立新的稳态阶段，在理论上需要经过无限长的时间才能达到，事实上经过一段较长的时间后，物体各处的温度就可近似地认为已达到新的稳态。

周期性的非稳态导热也是供热和空调工程中常遇到的一种情况。例如，夏季室外空气温度 t_f 以一天 24h 为周期进行周而复始的变化，相应地室外墙面温度 $t|_{x=0}$ 也以 24h 为周期进行变化，但是它比室外空气温度变化滞后一个相位，如图 6−2a 所示。

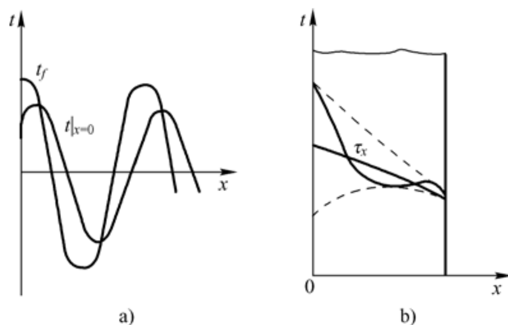


图 6−2　周期性导热的基本概念

这时尽管空调房间室内温度维持稳定，但墙内各处的温度受室外温度周期变化的影响，也会以同样的周期进行变化，如图 6−2b 所示，图中两条虚线分别表示墙内各处温度变化的

最高值与最低值，图中的斜线表示墙内各处温度周期性波动的平均值。如果将某一时刻τ_x墙内各处的温度连接起来，就得到τ_x时刻墙内的温度分布。

上述分析表明，在周期性非稳态导热问题中，一方面物体内各处的温度按一定的振幅随时间进行周期性波动；另一方面，同一时刻物体内的温度分布也呈周期性波动，如图 6–2b 所示的τ_x时刻墙内的温度分布。这就是周期性非稳态导热现象的特点。

在建筑环境与设备工程专业的热工计算中，这两类非稳态导热问题都会遇到，而热工计算的目的，归根到底就是要找出温度分布和热流密度随时间和空间的变化规律。

6.2 无限大平壁的瞬态导热

本节将较详细地分析推导无限大平壁在对流换热边界条件（即第三类边界条件）下加热和冷却时的分析解，并介绍工程上应用的诺谟图。通过对这一问题分析解的推导分析，可为学习其他边界条件下的分析解打下一定的基础。

假设有一厚度为δ的无限大平壁，如图 6–3 所示，平壁材料的导热系数λ和热扩散率α均为已知常数，初始时平壁各处与两侧介质温度均匀一致并等于t_0，这时突然把两侧介质温度降低为t_f并保持不变，使平壁处于冷却状态。

设此过程中平壁两侧表面与介质之间的表面传热系数均为h。分析这一现象可知，对于无限大平壁，它两侧的冷却情形相同，故平壁的温度分布是对称的。分析中把坐标轴x的原点放在平壁中心。

如图 6–3 所示，这是一维瞬态导热问题，其导热微分方程式为：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad \tau > 0,\quad -\delta < x < \delta \qquad (6\text{–}1)$$

相应的初始条件为：

$$\tau = 0,\quad t = t_0,\quad 0 \leqslant x \leqslant \delta \qquad (6\text{–}2)$$

边界条件为：

$$\left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \ （对称性），\ \tau > 0 \qquad (6\text{–}3)$$

$$-\lambda\left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{x=\delta} = h(t|_{x=\delta} - t_f) \quad \tau > 0 \qquad (6\text{–}4)$$

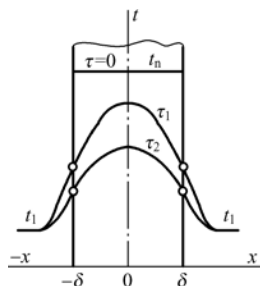


图 6–3 第三类边界条件下的瞬态导热

引用新的变量$\theta(x,\tau) = t(x,\tau) - t_f$，称为过余温度，这样式（6–1）～式（6–4）可改写为：

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \tau > 0,\quad -\delta < x < \delta \qquad (6\text{–}5)$$

$$\tau = 0,\quad \theta = \theta_0,\quad 0 \leqslant x \leqslant \delta \qquad (6\text{–}6)$$

$$\left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \quad \tau > 0 \qquad (6\text{–}7)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}\bigg|_{x=\delta} = h\theta\big|_{x=\delta} \quad \tau > 0 \tag{6-8}$$

应用分离变量法求解这一问题，假定：

$$\theta(x,\tau) = X(x)\phi(\tau) \tag{6-9}$$

将式（6-9）带入式（6-3），经过整理得到：

$$\frac{1}{a\phi}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}\tau} = \frac{1}{X}\frac{\mathrm{d}^2 X}{\mathrm{d}x^2} \tag{6-10}$$

式（6-10）等号左边仅是τ的函数，而等号右边仅是x的函数，要使式（6-10）在x和τ的定义域内，x和τ为任何值时均成立，只有等号两边都等于同一个常数μ，即：

$$\frac{1}{a\phi}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}\tau} = \mu \tag{6-11}$$

$$\frac{1}{X}\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}x} = \mu \tag{6-12}$$

对式（6-11）进行积分，得：

$$\phi = c_1 \exp(a\mu\tau) \tag{6-13}$$

上式中c_1是积分常数。分析式（6-13）可知，常数μ若为正值，ϕ将随着τ的增加而急剧增大，当τ值很大时，ϕ趋于无限大，$\theta(x,\tau)$也将趋于无限大，但实际上这是不可能的；常数μ若为零，ϕ将等于常数，这意味着$\theta(x,\tau)$将不随时间发生变化，而这也是不符合实际的。因此常数μ只能为负值，表示为$\mu = -\varepsilon^2$。于是，式（6-12）和（6-13）可以改写为：

$$\phi = -c_1 \exp(a\varepsilon^2\tau) \tag{6-14}$$

和

$$\frac{1}{X}\frac{\mathrm{d}^2 X}{\mathrm{d}x^2} = -\varepsilon^2 \tag{6-15}$$

常微分方程式（6-15）的通解为：

$$X = c_2\cos(\varepsilon x) + c_3\sin(\varepsilon x) \tag{6-16}$$

将式（6-14）和式（6-16）带回到式（6-9）得：

$$\theta(x,\tau) = [A\cos(\varepsilon x) + B\sin(\varepsilon x)\exp](-a\varepsilon^2\tau) \tag{6-17}$$

式中，$A = c_1c_2$，$B = c_2c_3$。式（6-17）中，常数A、B和ε可由初始条件和边界条件，即式（6-6）和式（6-7）及式（6-8）确定。

应用边界条件式（6-7），即温度场的对称性条件

$$\frac{\partial \theta}{\partial x}\bigg|_{x=0} = (A\varepsilon\cos 0 + B\varepsilon\sin 0)\exp(-a\varepsilon^2\tau) = 0 \tag{6-18}$$

上式成立，系数B必须等于零，式（6-17）可写成：

$$\theta(x,\tau) = A\varepsilon\cos(\varepsilon x)\exp(-a\varepsilon^2\tau) \tag{6-19}$$

应用边界条件（6-8），即将式（6-19）代入到（6-8）得：

$$-\lambda[-A\varepsilon\sin(\varepsilon\delta)]\exp(-a\varepsilon^2\tau)=hA\cos(\varepsilon\delta)\exp(-a\varepsilon^2\tau) \tag{6-20}$$

消去式（6−20）等号两边相同项得：

$$\lambda\varepsilon=h\cot(\varepsilon\delta) \tag{6-21}$$

将式（6−21）两边乘以δ并移项整理得：

$$\frac{\varepsilon\delta}{\left(\dfrac{h\delta}{\lambda}\right)}=\cot(\varepsilon\delta) \tag{6-22}$$

上式中$\dfrac{h\delta}{\lambda}$是个无量纲参数，称为比奥准则，用Bi表示。同时为了书写简便，令$\varepsilon\delta=\beta$，于是式（6−22）可以改写为：

$$\frac{\beta}{Bi}=\cot\beta \tag{6-23}$$

式（6−23）称为特征方程。从图6−4可以看出，β的解就是$y_1=\cot\beta$和$y_2=\dfrac{\beta}{Bi}$交点对应的β数值，由于$y_1=\cot\beta$是以π为周期的函数，因此y_1和y_2的交点将有无穷多个。常数β的无穷多个值，即β_1、$\beta_2\cdots\beta_n$称为特征值。对应于特征值的式（6−16）称为特征函数。很明显，特征值的数值与Bi有关，并依次增大。

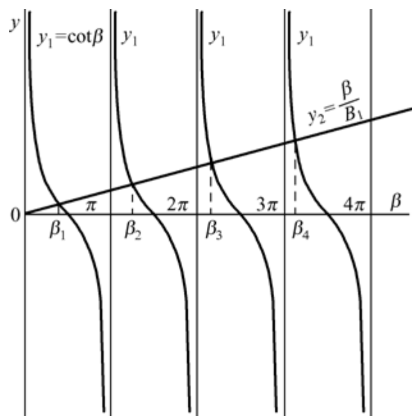


图6−4　特征方程的根

如图6−4所示，当$Bi\to\infty$时，直线$y_2=\dfrac{\beta}{Bi}$与横坐标重合，特征值为：

$$\beta_1=\frac{1}{2}\pi,\quad \beta_2=\frac{3}{2}\pi,\quad \beta_3=\frac{5}{2}\pi,\quad \cdots,\quad \beta_n=\frac{2n-1}{2}\pi \tag{6-24}$$

当$Bi\to 0$，直线$y_2=\dfrac{\beta}{Bi}$与纵坐标重合，特征值为：

$$\beta_1=0,\quad \beta_2=\pi,\quad \beta_3=2\pi,\quad \cdots,\quad \beta_n=(n-1)\pi \tag{6-25}$$

这样，在给定Bi准则条件下，对应于每一个特征值，式（6−19）给出一个温度分布的

特解，即：

$$\begin{cases}\theta_1(x,\tau)=A_1\cos(\varepsilon_1 x)\exp(-a\varepsilon^2\tau)\\ \theta_2(x,\tau)=A_2\cos(\varepsilon_2 x)\exp(-a\varepsilon^2\tau)\\ \qquad\vdots\\ \theta_n(x,\tau)=A_n\cos(\varepsilon_n x)\exp(-a\varepsilon^2\tau)\end{cases} \tag{6-26}$$

上式中常数 A_1 、 $A_2 \cdots A_n$ 为任何值，所得到的特解，即式（6-25）都将满足导热微分方程式（6-5）以及两个边界条件式（6-7）和式（6-8），但是式（6-25）并不满足初始条件。

因为式（6-5）和它的边界条件都是线性的，即式（6-5）、式（6-7）和式（6-8）中温度和温度的各阶导数项的系数不再取决于温度，所以式（6-26）中各个特解的线性叠加就得到 $\theta(x,\tau)$ 的解，于是：

$$\theta(x,\tau)=\sum_{n=1}^{\infty}\cos(\varepsilon_n x)\exp(-a\varepsilon^2\tau) \tag{6-27}$$

式中 ε_n 可以很容易地根据 β_n 确定，而系数 A_n 尚未确定，它可以应用初始条件式（6-6）求解，当 $\tau=0$ 时， $\theta=\theta_0$ ，式（6-27）简化为：

$$\theta_0=\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right) \tag{6-28}$$

将上式等号两边同乘以 $\cos(\beta_m\frac{x}{\delta})$ ，并在 $0 \leqslant x \leqslant \delta$ 范围内进行积分，得：

$$\theta_0\int_0^{\delta}\cos(\beta_m\frac{x}{\delta})\mathrm{d}x=\int_0^{\delta}\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\cos\left(\beta_m\frac{x}{\delta}\right)\mathrm{d}x \tag{6-29}$$

考虑到特征函数的正交性，即：

$$\int_0^{\delta}\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\cos\left(\beta_m\frac{x}{\delta}\right)\mathrm{d}x=0 \quad m\neq n$$

这样，式（6-29）可以简化为：

$$\theta_0\int_0^{\delta}\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)=A_n\int_0^{\delta}\cos^2\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\mathrm{d}x$$

于是：

$$A_n=\frac{\theta_0\int_0^{\delta}\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\mathrm{d}x}{\int_0^{\delta}\cos^2\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\mathrm{d}x}=\theta_0\frac{2\sin\beta_n}{\beta_n+\sin\beta_n\cos\beta_n} \tag{6-30}$$

将式（6-30）代入到式（6-27），得到第三类边界条件下无限大平壁冷却时壁内的温度分布：

$$\theta(x,\tau)=\theta_0\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\sin\beta_n}{\beta_n+\sin\beta_n\cos\beta_n}\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\exp\left(-\beta_n^2\frac{a\tau}{\delta^2}\right)$$

或

$$\frac{\theta(x,\tau)}{\theta_0}=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\sin\beta_n}{\beta_n+\sin\beta_n\cos\beta_n}\cos\left(\beta_n\frac{x}{\delta}\right)\exp\left(-\beta_n^2\frac{a\tau}{\delta^2}\right) \tag{6-31}$$

式中，$\frac{a\tau}{\delta^2}$是一个无量纲参数，用符号F_O表示，称为傅里叶准则，它是非稳态导热过程的无量纲时间。应该指出，式（6−31）是第三类边界条件下无限大平壁冷却时得到的解，可以证明，保持过余温度$\theta=t-t_f$的定义不变，这些公式对于加热过程仍是正确的。

6.3 瞬态导热分析案例一——无限大平壁导热

本节主要介绍了一个二维的无限大平壁的导热过程的解析计算方法与仿真操作流程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中无限大平壁瞬态热的建模方法及求解过程，同时掌握无限大平壁瞬态导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter6\char06−1\ex5.wbpj

6.3.1 问题描述

本实例为一个无限大平壁，厚度为 0.5m，已知平壁的热物性参数$\lambda=0.815$ W/(m·K)，$c=0.839$ kJ/(kg·K)，$\rho=1500$ kg/m^3，壁内温度初始时均匀一致为 18℃，给定第三类边界条件：壁两侧面流体温度为 8℃，流体与壁面之间的表面传热系数$h=8.15$ W/(m^2·K)，试求 6h 后平壁中心及表面的温度。

6.3.2 解析解法如下

【解】 根据平壁的热物性参数求平壁的热扩散率：

$$a=\frac{\lambda}{\rho c}=\frac{0.815}{1500\times0.839\times1000}=0.65\times10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$$

确定F_O和Bi准则：

$$F_O=\frac{a\tau}{\delta^2}=\frac{0.65\times10^{-6}\times6\times3600}{0.25^2}=0.22$$

$$Bi=\frac{h\delta}{\lambda}=\frac{8.15\times0.25}{0.815}=2.5$$

因为$F_O>0.2$，可以用公式（6−31）计算。此时可知当$Bi=2.5$时，$\beta_1=1.1347$。于是：

$$\sin\beta_1 = \sin\left(1.1347\times\frac{180^0}{\pi}\right) = 0.9064$$

$$\cos\beta_1 = \cos\left(1.1347\times\frac{180^0}{\pi}\right) = 0.4224$$

应用式（6-31），对于平壁中心，即 $x=0$ 处，无量纲温度为：

$$\frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{2\sin\beta_1}{\beta_1+\sin\beta_1\cos\beta_1}\exp(-\beta_1^2F_O) = \frac{2\times0.9064}{1.1347+0.9064\times0.4224}\exp(-0.283) = 0.9$$

而：

$$\theta_m = 0.9\theta_0 = 0.9\times(18-8) = 9℃$$

$$t_w = \theta_w + t_f = 9+8 = 17℃$$

对于平壁表面，即 $x=\delta$ 处，无量纲温度为：

$$\begin{aligned}\frac{\theta_m}{\theta_0} &= \frac{2\sin\beta_1}{\beta_1+\sin\beta_1\cos\beta_1}\cos(\beta_t)\exp(-\beta_1^2F_O)\\ &= \frac{2\times0.9064}{1.1347+0.9064\times0.4224}\times0.4224\times\exp(-0.283) = 0.38\end{aligned}$$

而

$$\theta_w = 0.38\theta_0 = 0.38\times(18-8) = 3.8℃$$

$$t_w = \theta_w + t_f = 3.8+8 = 11.8℃$$

6.3.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：在 Workbench 平台中依次选择菜单 Tools→Options，如图 6-5 所示。

Step3：在弹出的 Options（设置）对话框中选择 Geometry Import 选项，在 Analysis Type 栏中选择分析类型为 2D，其余默认即可，如图 6-6 所示，单击 OK 按钮。

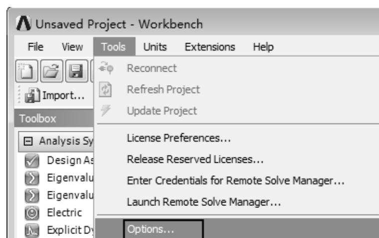


图 6-5　菜单

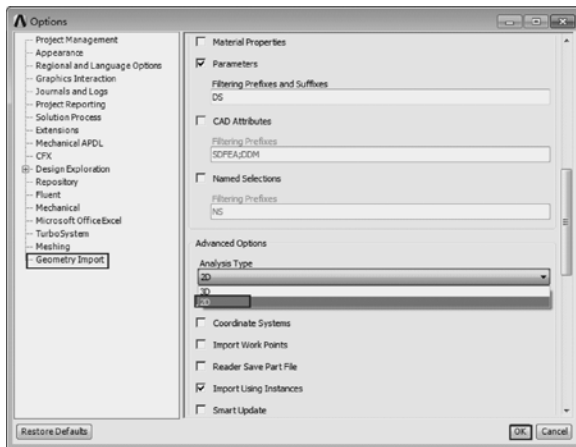


图 6-6　分析类型

Step4： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，然后以同样的操作方式拖曳一个 Transient Thermal（瞬态分析）到 A6（Solution）中，如图 6-7 所示。

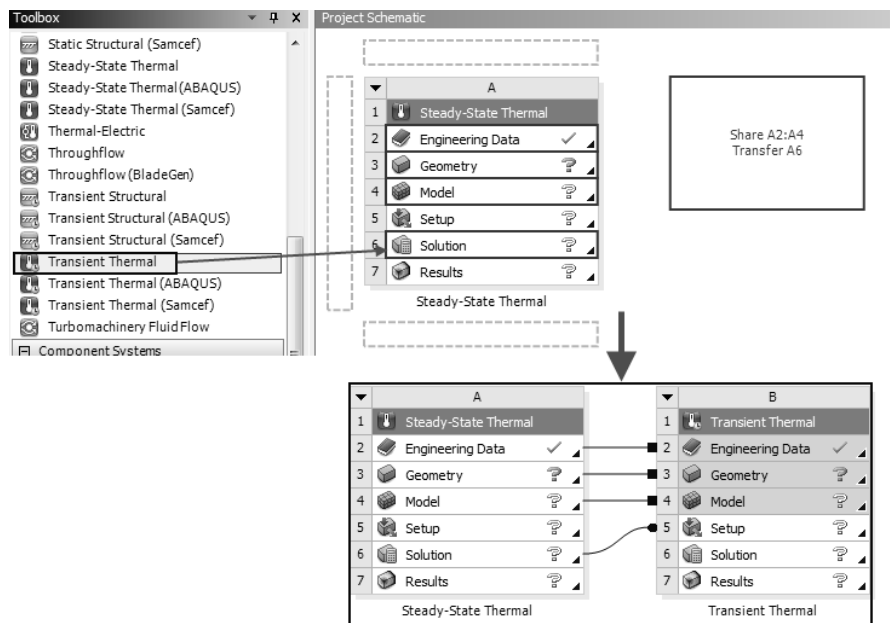


图 6-7 创建分析项目 A

6.3.4 创建几何体模型

Step1： 在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 6-8 所示。

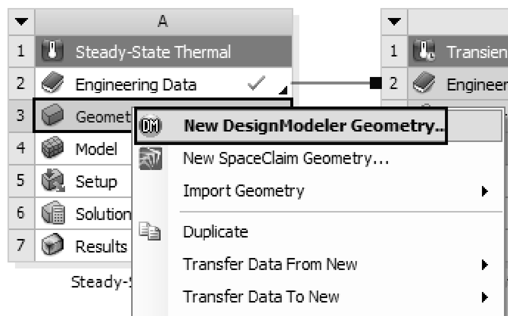


图 6-8 导入几何体

Step2： 在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，单击 DM 窗口中的 Tree Outline→XYPlane，再选择 Sketching 选项卡，选择 Draw→Retangle 命令，从坐标原点开始绘制一个矩形。



Step3： 选择 Dimensions→General，标注矩形的长和宽，如图 6-9 所示，设置 V1=2000mm，H2=500mm。

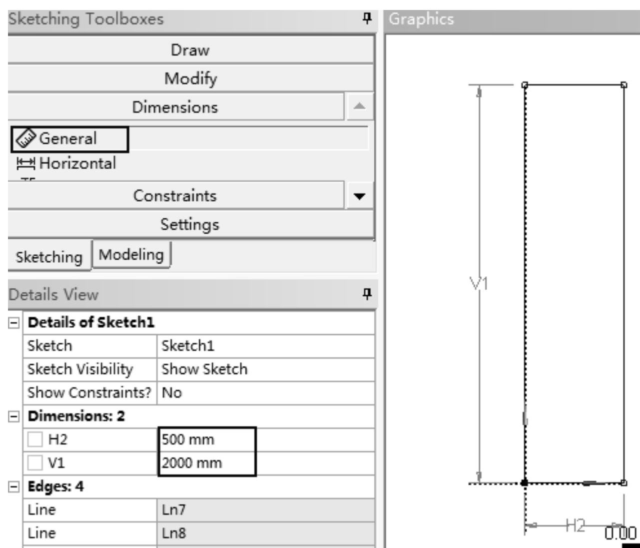


图 6-9　标注

Step4： 切换到 Modeling 选项卡，依次选择 Concept→Surface From Sketches（从草绘生成面）命令，如图 6-10 所示。

Step5： 在 Details View 详细设置面板中的 Base Objects 栏中选择刚才建立的 Sketch1，并单击工具栏中的“生成”命令，如图 6-11 所示。

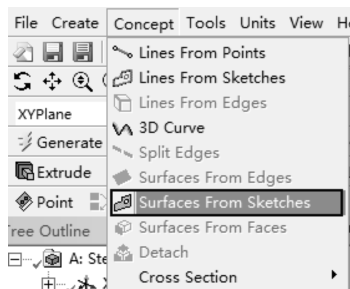


图 6-10　菜单

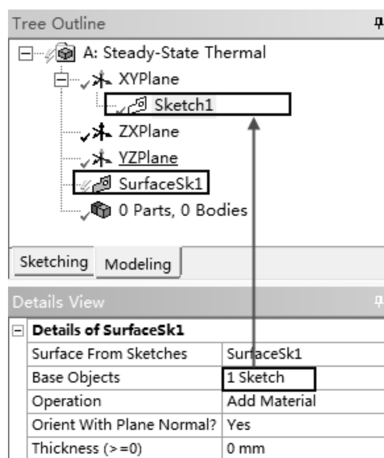


图 6-11　模型

Step6： 几何生成完成后，单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex5.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step7： 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6.3.5 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面右键单击 A2：Engineering Data 项，在弹出的图 6-12 所示的快捷菜单中选择 Edit 命令。

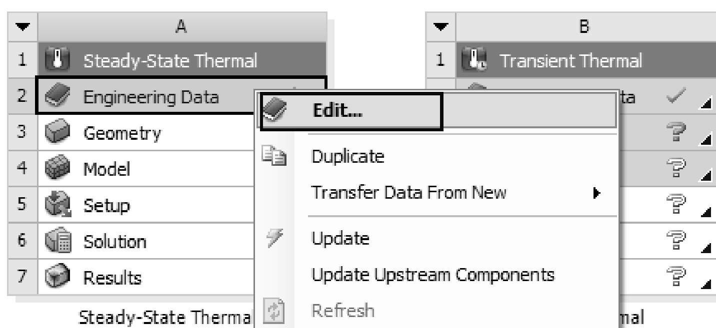


图 6-12 快捷菜单

Step2：在 Outline of Schematic A2，B2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧的 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时在 Properties of Outline Row 4：mat 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 中输入 0.815，同样 Density 为 1500，Specific Heat 为 839，输入完成后，在工具栏中单击 A2:Engineering Data ×中的“关闭”按钮关闭材料设置窗口，如图 6-13 所示。

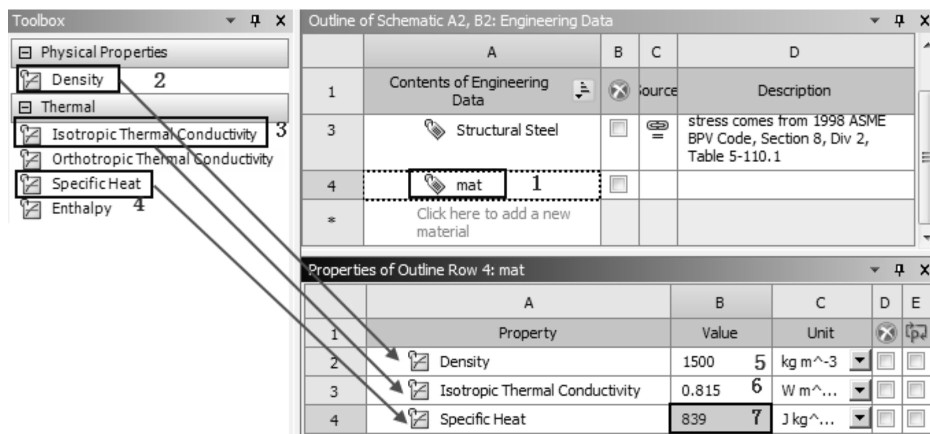


图 6-13 设置材料

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 6-14 所示的 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Surface Body，此时即可在 Details of“Surface Body”（参数列表）中给模型添加材料，如图 6-15 所示。



Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

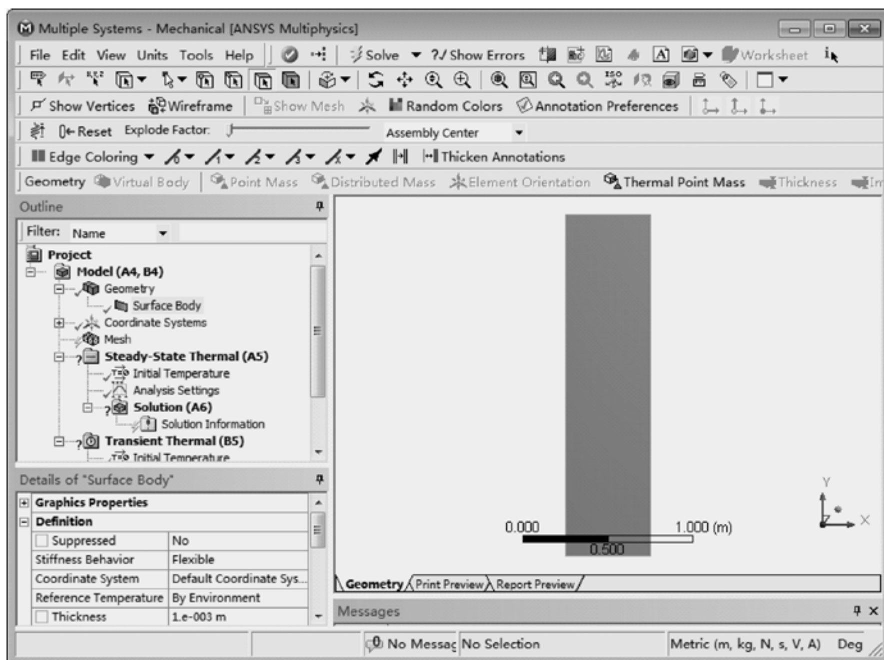


图 6-14　Mechanical 界面

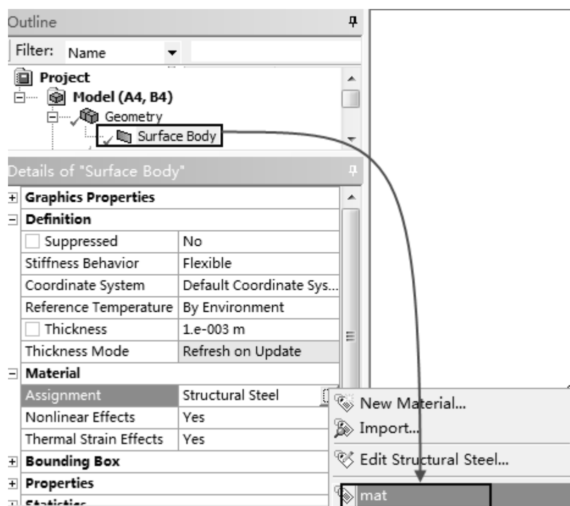


图 6-15　修改材料属性

6.3.6　划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Sizing 命令，如图 6-16 所示。

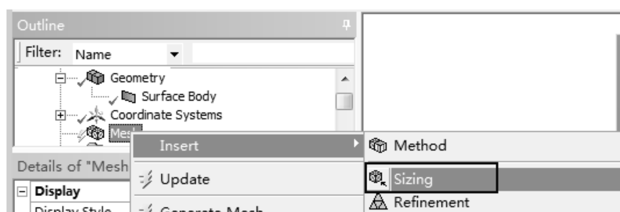


图 6-16 快捷菜单

Step2：在 Details of“Edge Sizing”详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中图示上的四条边，并单击 Apply 按钮，如图 6-17 所示；在 Element Size 栏中输入 5.e-002m，其余默认即可。

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 6-18 所示。

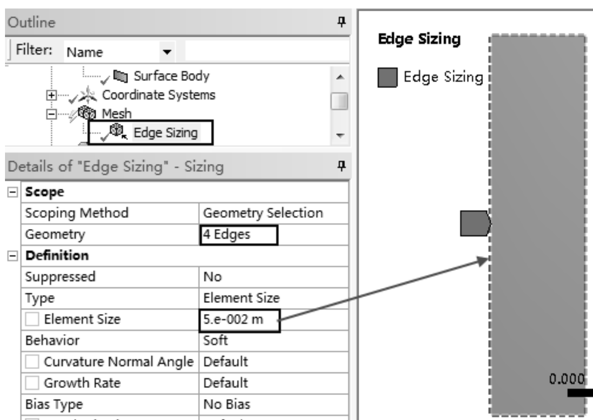


图 6-17 网格设置

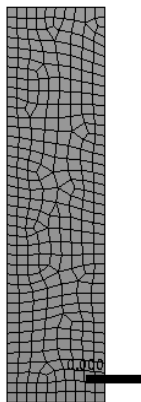


图 6-18 网格效果

6.3.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，如图 6-19 所示，此时会出现 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 6-20 所示。

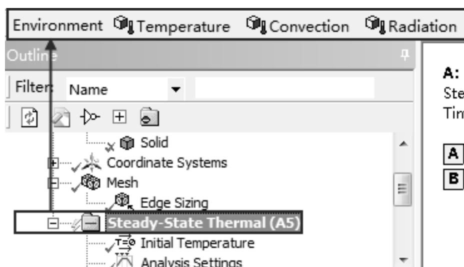


图 6-19 Environment 工具栏

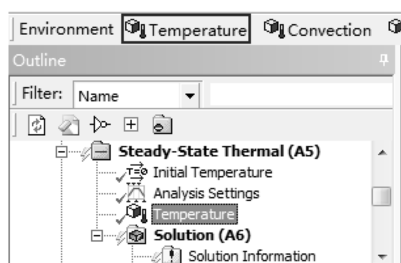


图 6-20 添加载荷

Step3：如图 6−21 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：

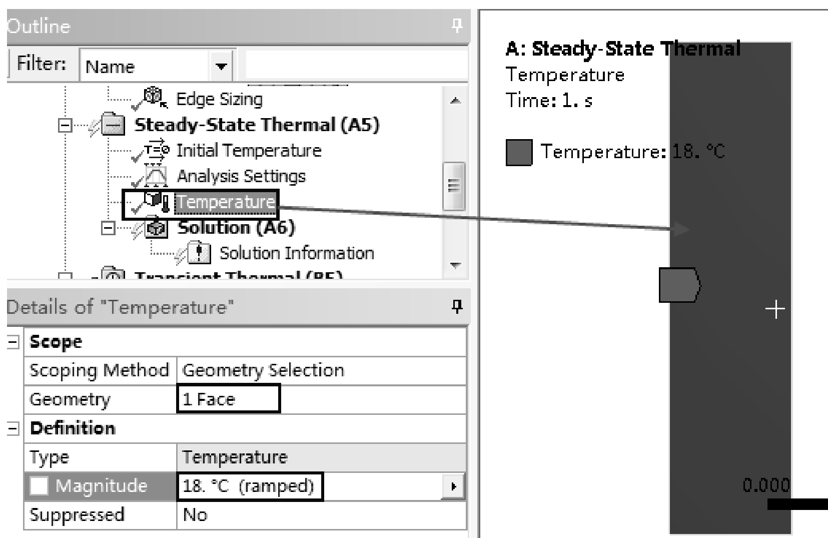


图 6−21 施加载荷

在 Geometry 中选择选择几何表面；在 Definition→Magnitude 栏中输入 18℃（ramped）；其余默认即可，完成一个温度的添加。

Step4：在 Outlines（分析树）中，选择 Steady-State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6−22 所示。

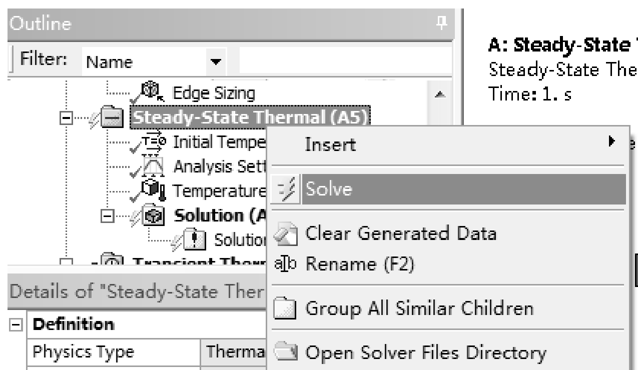


图 6−22 求解

6.3.8 瞬态计算

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal (B5)（瞬态计算）选项，此时会出现图 6−23 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Convection（对流）命令，此时在分析树中会出现 Convection 选项，如图 6−24 所示。

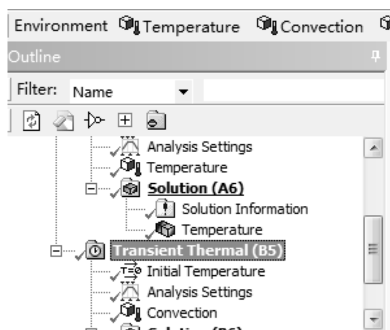


图 6-23　Solution 工具栏

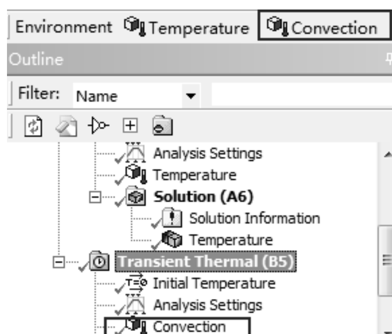


图 6-24　添加对流选项

Step3：选择 Convection 命令，在出现的 Details of “Convection”详细设置面板中作如下设置，如图 6-25 所示：在 Geometry 栏中选中两侧的边线；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 8.15；在 Ambient Temperature 栏中输入环境温度为 8℃，其余默认即可。

Step4：设置分析选项。单击 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在图 6-26 所示的分析选项设置窗口中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 21600s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 100，其余默认即可。

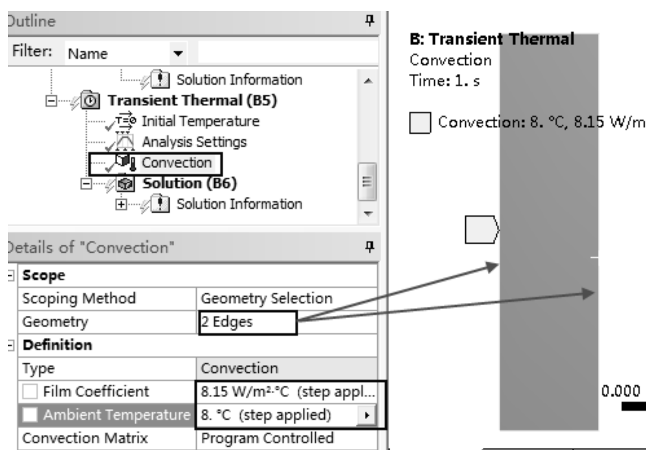


图 6-25　对流选项

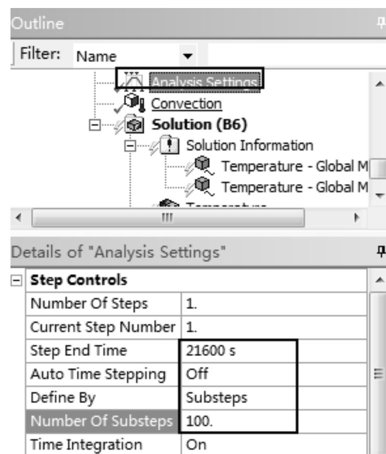


图 6-26　分析设置

Step5：在 Outlines（分析树）中选择 Solution（B6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6-27 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step6：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形），得出温度分布图如图 6-28 所示。

Step7：单击 Solution→Solution Information→Temperature-Global Maximum，将显示图 6-29 所示的温度曲线图。

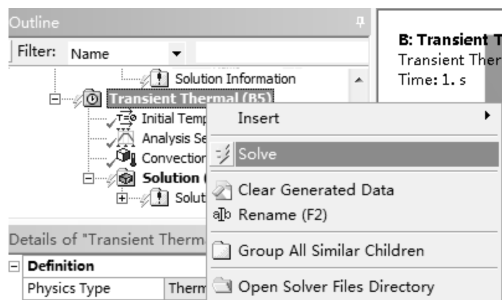


图 6-27　快捷菜单

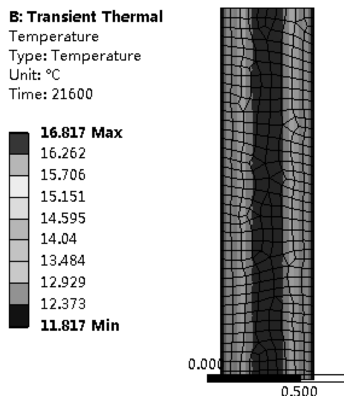


图 6-28　温度分布

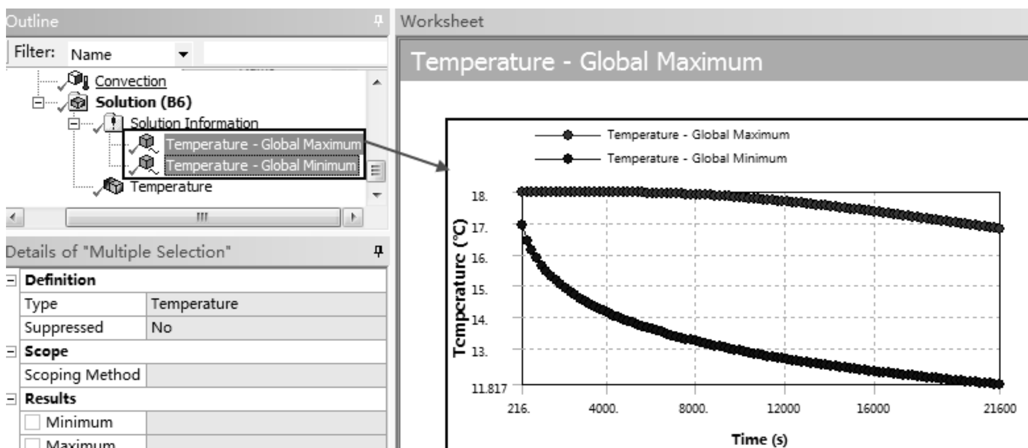


图 6-29　温度曲线

6.3.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

【分析】 解析解与仿真解见表 6-1。

表 6-1　解析解与仿真解

结果	解析解	仿真解
中心温度	17	16.817
侧面温度	11.8	11.817

从上述分析可以看出，仿真结果与解析方法算出的结果一致。

6.4 瞬态导热分析案例二——热电偶节点散热仿真

本节主要对一个热电偶的接点（近似为一个球体）的温度与散热过程进行解析计算，同时给出了仿真计算的操作方法。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中热电偶的接点瞬态热的建模方法及求解过程，同时掌握热电偶的接点瞬态导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter6\char06-2\ex6.wbpj

6.4.1 问题描述

用一个热电偶测量气流的温度，其接点可近似为一个球体，如图 6-30 所示。接点表面与气流之间的对流换热系数为 $h = 400\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$、接点的热物性为 $k = 20\text{W/(m}\cdot\text{K)}$、$c = 400\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$\rho = 8500\text{kg/m}^3$。确定使时间常数为 1s 的热电偶接点的直径，以及若将温度为 25℃的接点放在 200℃的气流中，热电偶接点达到 199℃需要多少时间。

6.4.2 解析解法介绍

【解】 由于并不知道接点的直径，所以需要确定接点的直径大小，由热时间常数公式 $\tau_t = (\frac{1}{hA_s})(\rho Vc) = R_t C_t$ 及 $A_s = \pi D^2$ 和 $V = \pi^3/6$ 可得：

$\tau_t = \frac{1}{h\pi D^2} \times \frac{\rho\pi D^3}{6} c$，重新整理后代入数值得：

$$D = \frac{6h\tau_t}{\rho c} = \frac{6\times 400\times 1}{8500\times 400} = 7.06\times 10^{-4}\text{m}$$

利用 $L_c = r_0/3$，由式 $Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{400\times\frac{7.06\times 10^{-4}}{2\times 3}}{20} = 0.0024 < 0.1$ 可知，可以采用集总参数法进行近似计算。即：

$$t = \frac{\rho(\pi D^3/6)c}{h(\pi D^2)}\ln\frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} = \frac{\rho Dc}{6h}\ln\frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty}$$

$$= \frac{8500\times 7.06\times 10^{-4}\times 400}{6\times 400}\ln\frac{25-200}{199-200} = 5.2\text{s}$$

6.4.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal

（稳态热分析）选项，右键单击 A6 创建一个 Transient Thermal（瞬态热分析），即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目，如图 6-31 所示。

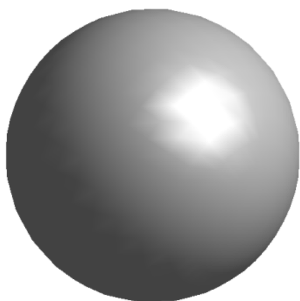


图 6-30　模型

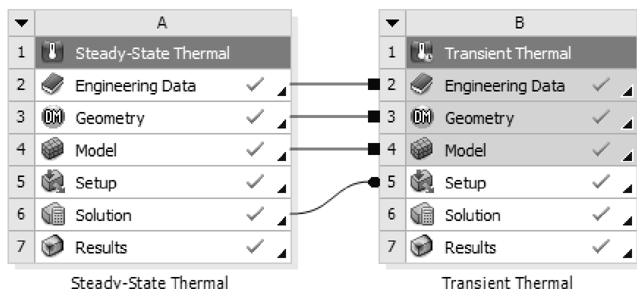


图 6-31　创建分析项目

6.4.4 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 6-32 所示。

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，依次选择菜单 Create→Primitive→Sphere（球）命令，在出现的 Details View 详细设置面板中的 FD6，Radius（>0）栏中输入半径为 0.353mm，如图 6-33 所示。

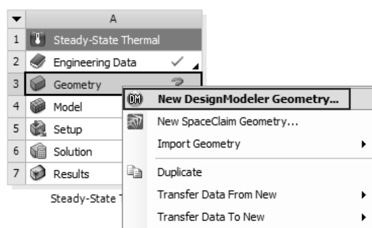


图 6-32　导入几何体

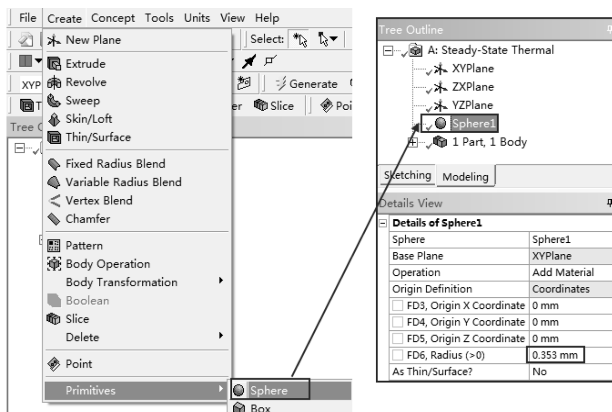


图 6-33　生成后的 DesignModeler 界面

Step3：单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex6.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step4：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6.4.5 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2（Engineering Data）进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 6-34 所示。

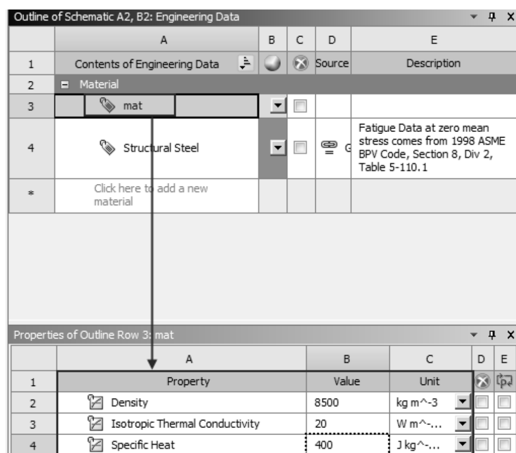


图 6-34 设置材料

Step2：在 Outline of Schematic A2，B2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入三种材料的名称分别为 mat1、mat2 及 mat3，然后从左侧的 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时在 Properties of Outline Row 3：mat 中，设置 Isotropic Thermal Conductivity 为 20，Density 为 8500，Specific Heat 为 400，在工具栏中单击 ✖按钮关闭材料设置窗口。

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 6-35 所示的 Multiple System-Mechanical（ANSYS Multiphysics）界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

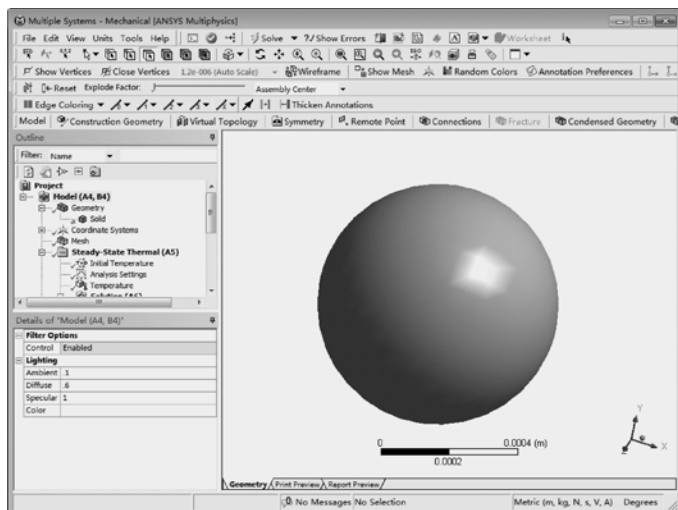


图 6-35 Mechanical 界面



Step4：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中选择 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 6-36 所示。

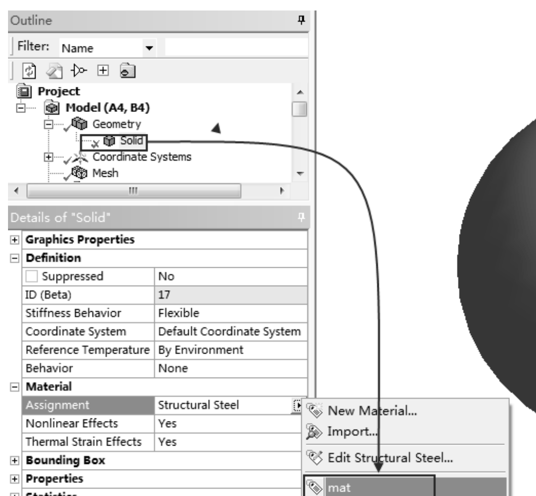


图 6-36　修改材料属性

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

6.4.6 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置窗口的 Element Size 栏中输入 1.e−004m，如图 6-37 所示。

Step2：选择 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 6-38 所示。

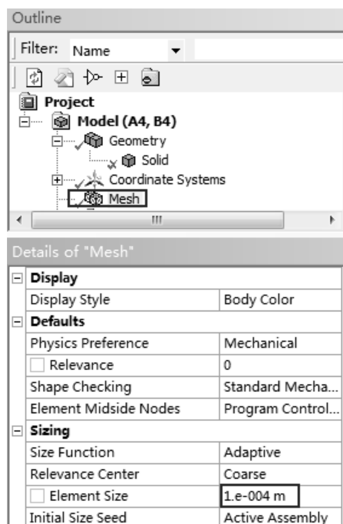


图 6-37　网格设置

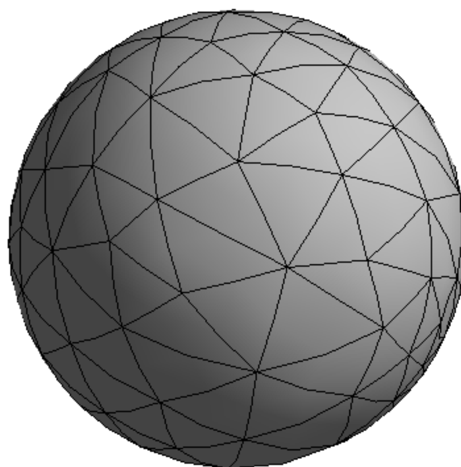


图 6-38　网格效果

6.4.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 6-39 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 6-40 所示。

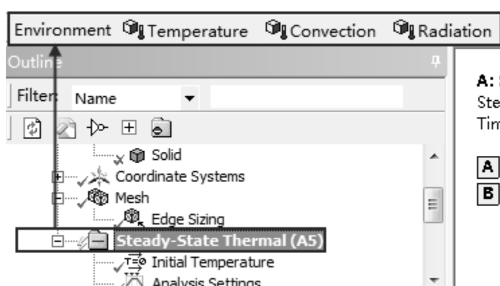


图 6-39　Environment 工具栏

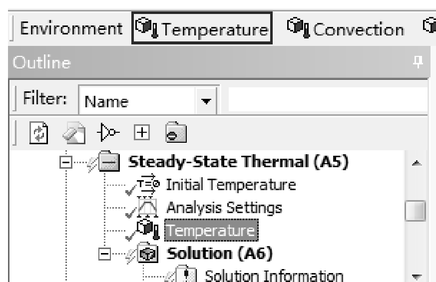


图 6-40　添加载荷

Step3：如图 6-41 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”设置面板中作如下操作：在 Geometry 中选择球体；在 Definition 下的 Magnitude 栏中输入 25；其余默认即可，完成一个温度的添加。

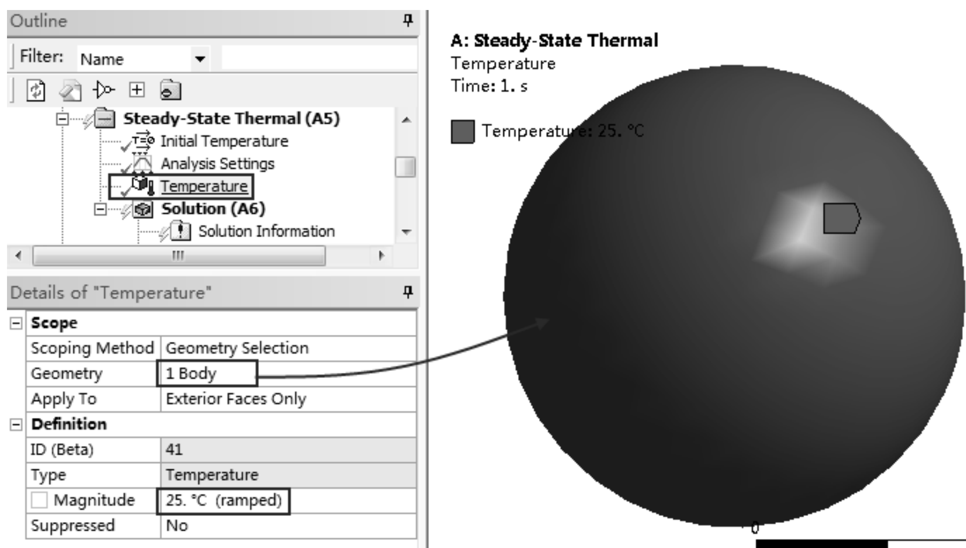


图 6-41　温度载荷

Step4：在 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6-42 所示。

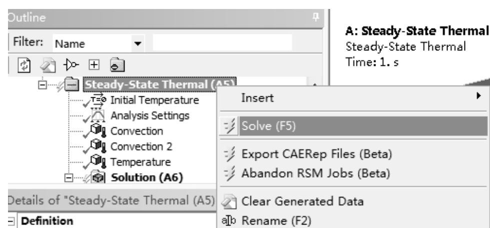


图 6-42　选择 Solve 命令

6.4.8 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 6-43 所示的 Solution 工具栏。

Step2： 选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 6-44 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

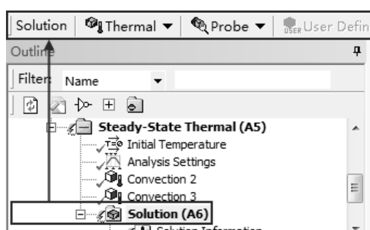


图 6-43　Solution 工具栏

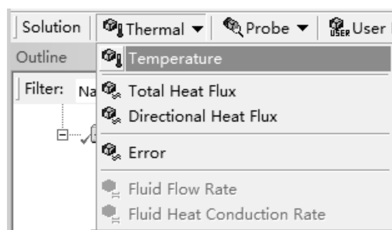


图 6-44　添加温度选项

Step3： 选择 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Evaluate All Results 命令，如图 6-45 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4： 选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 6-46 所示。

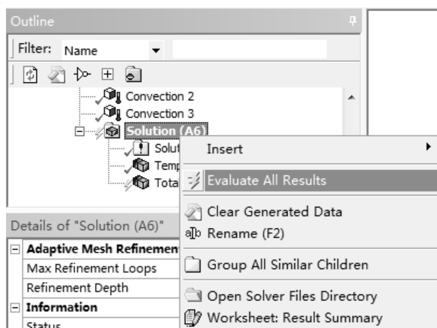


图 6-45　快捷菜单

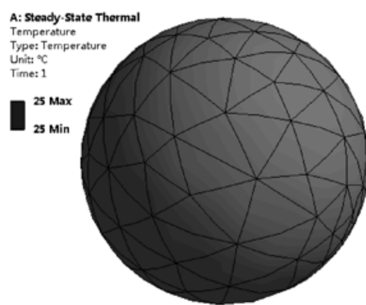


图 6-46　温度分布

Step5： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在出现的图 6-47 所示的 Environment 工具栏中选择 Convection 选项。

Step6：选择 Convection 选项，然后在 Details of “Convection”设置面板中作如下设置，如图 6-48 所示：在 Geometry 栏中确定球外表面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 400；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 200℃，其余默认即可。

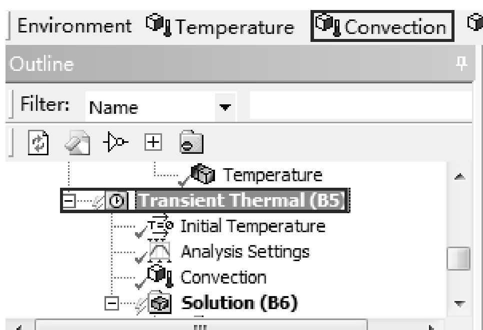


图 6-47 快捷菜单

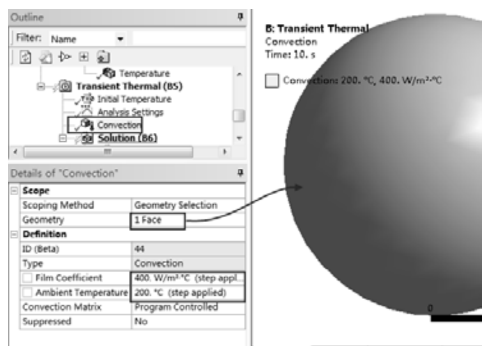


图 6-48 温度分布

Step7：设置分析选项。选择 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在图 6-49 所示的分析选项设置面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 10s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 200，其余默认即可。

Step8：选择 Outlines（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6-50 所示。

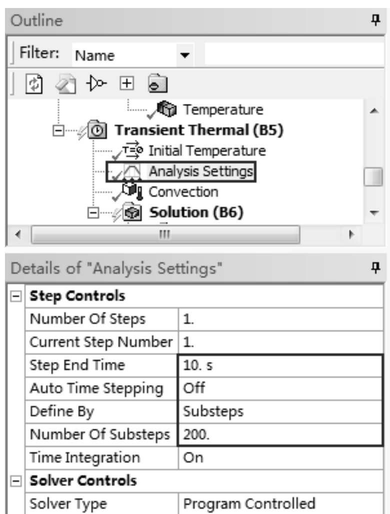


图 6-49 温度分布

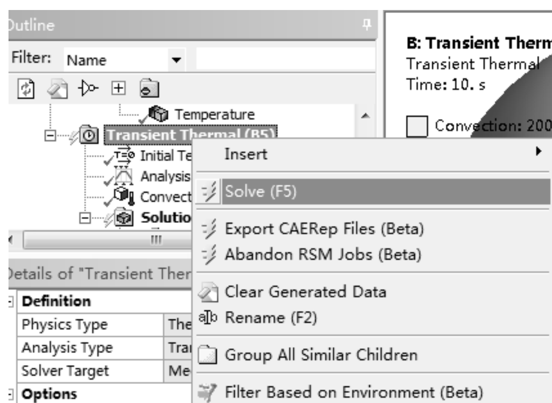


图 6-50 求解

Step9：选择 Solution→Solution Information→Temperature－Global Maximum 命令，将显示图 6-51 所示的温度曲线图。

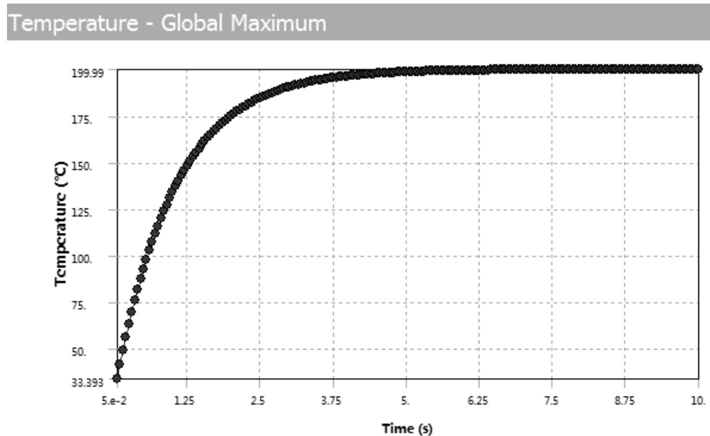


图 6-51　温度曲线图

Step10：添加一个 Temperature 后处理命令，通过后处理可以看出图 6-52 所示的各个时刻的温度值，可以看出时间为 5.3s 时的温度为 198.99℃。

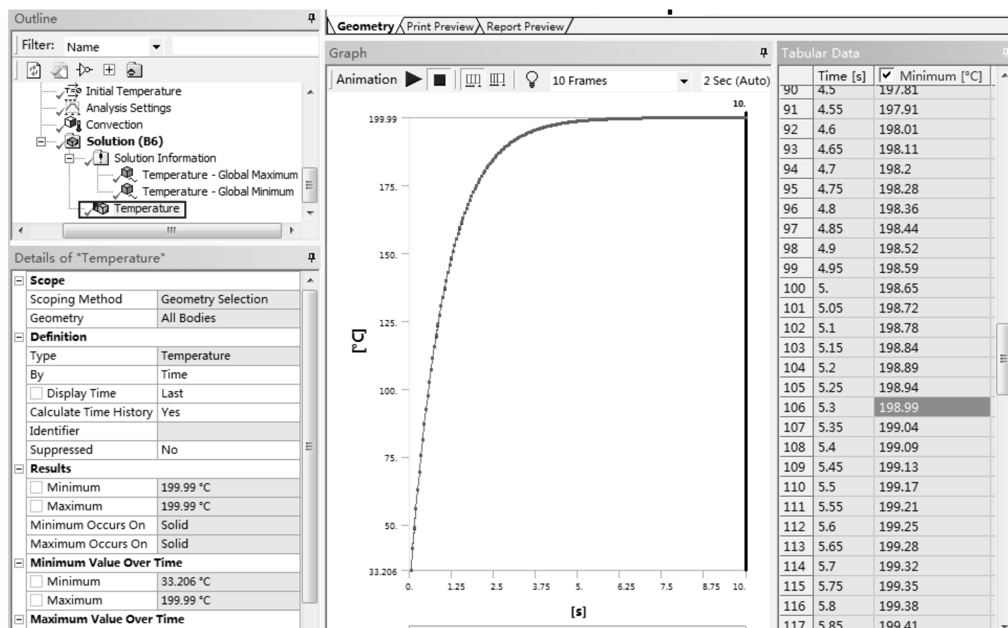


图 6-52　曲线图

6.4.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

【分析】 解析解与仿真解见表 6–2 所示。

表 6–2　解析解与仿真解

结果	解析解	仿真解
时间	5.2s	5.3s

从上述分析可以看出，仿真结果与解析方法算出的结果一致。

6.5　瞬态导热分析案例三——圆柱筒导热

本节案例主要通过解析法与仿真手段对一个圆柱的四个典型位置的温度值进行计算。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中圆柱瞬态热的建模方法及求解过程，同时掌握圆柱瞬态导热的解析计算方法。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter6\char06-3\ex7.wbpj

6.5.1　问题描述

有一直径为 0.3m、长度为 0.6m 的钢圆柱，初始温度为 20℃，放入炉温为 1020℃的炉内加热，已知钢的导热系数 $\lambda = 30\text{W/(m}\cdot\text{K)}$，密度为 $\rho = 7850\text{kg/m}^3$，比热容为 $c_p = 611.5\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，钢柱表面与炉内介质之间的换热系数 $h = 200\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$，试求加热 1h 后，图 6–53 所示的圆柱表面和中心点 1、2、3 和 4 的温度。其模型如图 6–54 所示。

6.5.2　解析解法介绍

【解】 短圆柱可认为是半径 $R = 0.15\,\text{m}$ 的无限长圆柱和厚度为 $2\delta = 0.6\,\text{m}$ 的无限大平壁垂直相交形成的。

对于无限长圆柱体：

$$Bi = \frac{hR}{\lambda} = \frac{200 \times 0.15}{30} = 1$$

$$F_O = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{\lambda\tau / (\rho c)}{\delta^2}$$

$$= \frac{30 \times 3600 / (7850 \times 611.5)}{0.15^2} = 1$$

从附录 A 表中查得：

$$\left(\frac{\theta_m}{\theta_0}\right)_c = 0.25\,,\quad \left(\frac{\theta_w}{\theta_m}\right)_c = 0.64$$

于是有：

$$\left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_c = 0.25 \times 0.64 = 0.16$$

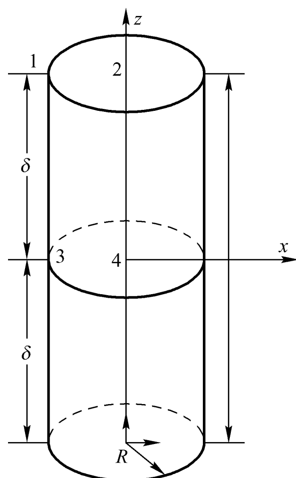


图 6–53　算例图

上述式中的右下角编码 c 表示无限长圆柱。

对于无限大平壁来说：

$$Bi = \frac{h\delta}{\lambda} = \frac{200 \times 0.3}{30} = 2$$

$$F_O = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{\lambda\tau / (\rho c)}{\delta^2} = \frac{30 \times 3600 / (7850 \times 611.5)}{0.3^2} = 0.25$$

从附录 A 表中查得：

$$\left(\frac{\theta_m}{\theta_0}\right)_p = 0.88\text{，}\left(\frac{\theta_w}{\theta_m}\right)_p = 0.47$$

于是有：

$$\left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p = 0.88 \times 0.47 = 0.42$$

上述式中的右下角编码 p 表示无限长圆柱。

加热 1h 后，短圆柱体点 1 的温度为：

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_c \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p = 0.16 \times 0.42 = 0.067$$

$$\theta_1 = 0.067\theta_0 = 0.067 \times (20 - 1020) = -67℃$$

$$t_1 = \theta_1 + t_f = -67 + 1020 = 953℃$$

加热 1h 后，短圆柱体点 2 的温度为：

$$\frac{\theta_2}{\theta_0} = \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_c \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p = 0.25 \times 0.42 = 0.105$$

$$\theta_1 = 0.105\theta_0 = 0.105 \times (20 - 1020) = -105℃$$

$$t_2 = \theta_2 + t_f = -105 + 1020 = 915℃$$

加热 1h 后，短圆柱体点 3 的温度为：

$$\frac{\theta_3}{\theta_0} = \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_c \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p = 0.16 \times 0.88 = 0.141$$

$$\theta_1 = 0.141\theta_0 = 0.141 \times (20 - 1020) = -141℃$$

$$t_3 = \theta_3 + t_f = -141 + 1020 = 879℃$$

加热 1h 后，短圆柱体点 4 的温度为：

$$\frac{\theta_4}{\theta_0} = \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_c \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p = 0.25 \times 0.88 = 0.22$$

$$\theta_1 = 0.141\theta_0 = 0.141 \times (20 - 1020) = -141℃$$

$$t_3 = \theta_3 + t_f = -220 + 1020 = 800℃$$

6.5.3 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，右键单击 A6 创建一个 Transient Thermal（瞬态热分析），即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目，如图 6−55 所示。

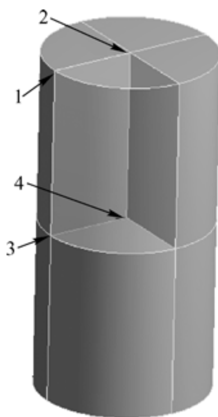


图 6−54　模型

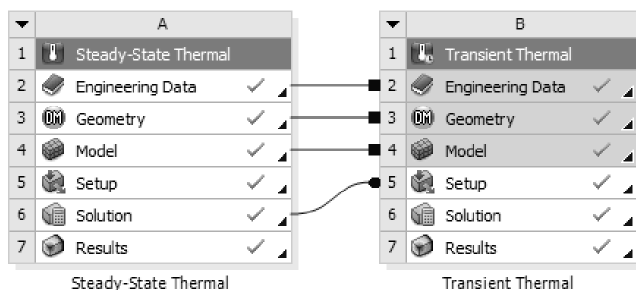


图 6−55　创建分析项目

6.5.4 创建几何体模型

Step1： 在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 6−56 所示。

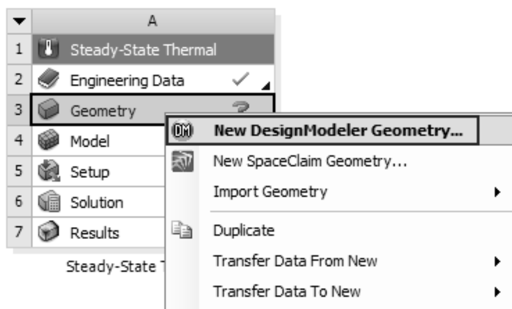


图 6−56　导入几何体

Step2： 在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，在 XY 平面上绘制图 6−57 所示的圆，并标注圆的直径为 300mm。

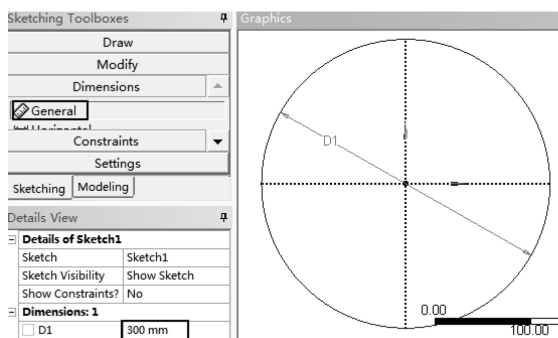


图 6–57 几何生成

Step3：在 Modeling 选项卡中单击工具栏中的拉伸命令，在弹出的 Details View 详细设置面板中作如下操作，如图 6–58 所示：在 Geometry 栏中确保刚才绘制的几何被选中；在 Operation 栏中选择 Add Frozen 选项；在 FD1,Depth(>0)栏中输入长度为 300mm，其余默认即可，选择工具栏中的 Generate 命令，生成几何体。

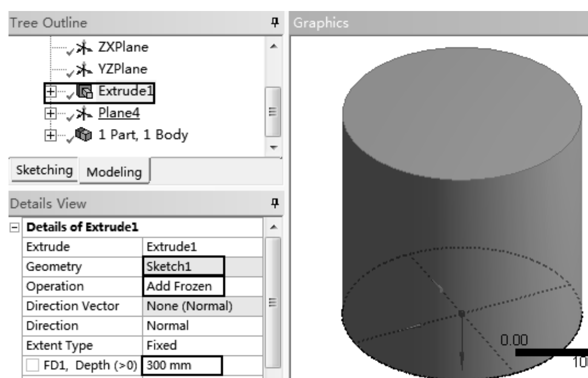


图 6–58 拉伸

Step4：选择 z 坐标最小位置的底面，绘制直径为 300mm 的圆，然后在 Modeling 选项卡中选择工具栏中的拉伸命令，在弹出的 Details View 详细设置面板中作如下操作，如图 6–59 所示：在 Geometry 栏中确保刚才绘制的几何被选中；在 Operation 栏中选择 Add Frozen 选项；在 FD1,Depth(>0)栏中输入长度为 300mm，其余默认即可，选择工具栏中的 Generate 命令，生成几何体。

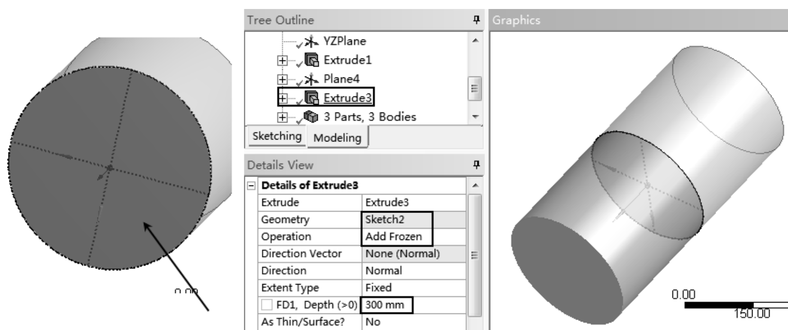


图 6–59 草绘

Step5：选择菜单 Create→Slice 命令，在弹出的图 6-60 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Slice Type 栏中选择 Slice by Plane 选项；在 Base Plane 栏中选择 ZXPlane（单击模型树中的 ZXPlane，然后单击此处的 Apply 按钮即可）；在 Slice Targets 栏中选择 Selected Bodies；在 Bodies 栏中确保两个圆柱被选中，切分完的几何模型如图 6-59 右图所示。

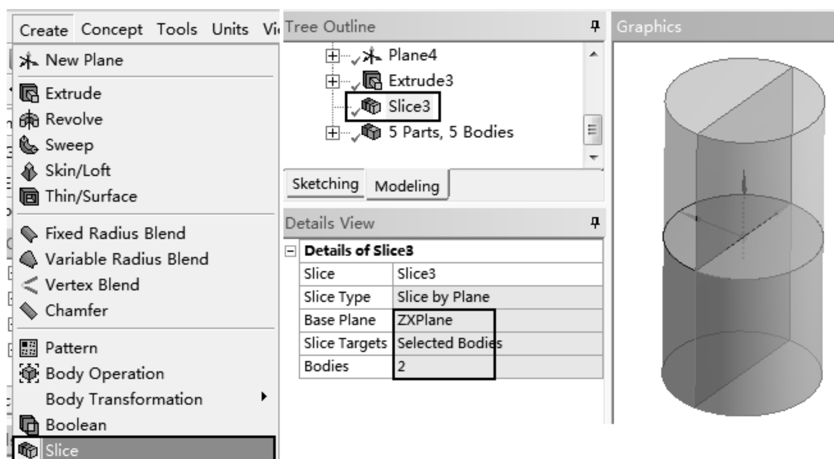


图 6-60　分割

Step6：选择菜单 Create→Slice 命令，在弹出的图 6-61 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Slice Type 栏中选择 Slice by Plane 选项；在 Base Plane 栏中选择 YZPlane（单击模型树中的 YZPlane，然后单击此处的 Apply 按钮即可）；在 Slice Targets 栏中选择 Selected Bodies；在 Bodies 栏中确保 4 个实体被选中，切分完的几何模型如图 6-61 右图所示。

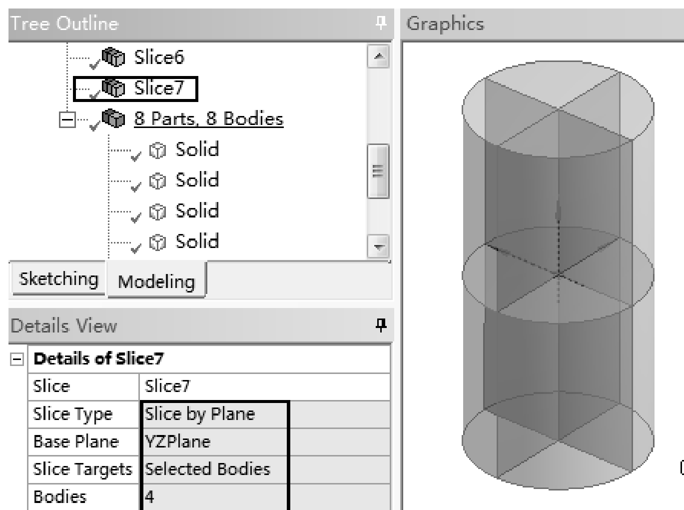


图 6-61　分割

Step7： 单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex7.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step8： 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6.5.5 创建分析项目

Step1： 在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面，如图 6-62 所示。

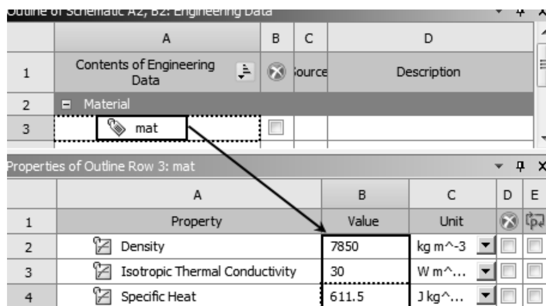


图 6-62 设置材料

Step2： 在 Outline of Schematic A2，B2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料名称为 mat，然后从左侧的 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时在 Properties of Outline Row 3：mat 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 中输入 30，同样操作 Density 为 7850，Specific Heat 为 611.5，在工具栏中单击 A2:Engineering Data ×中的“关闭”按钮关闭材料设置窗口。

Step3： 双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 6-63 所示的 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

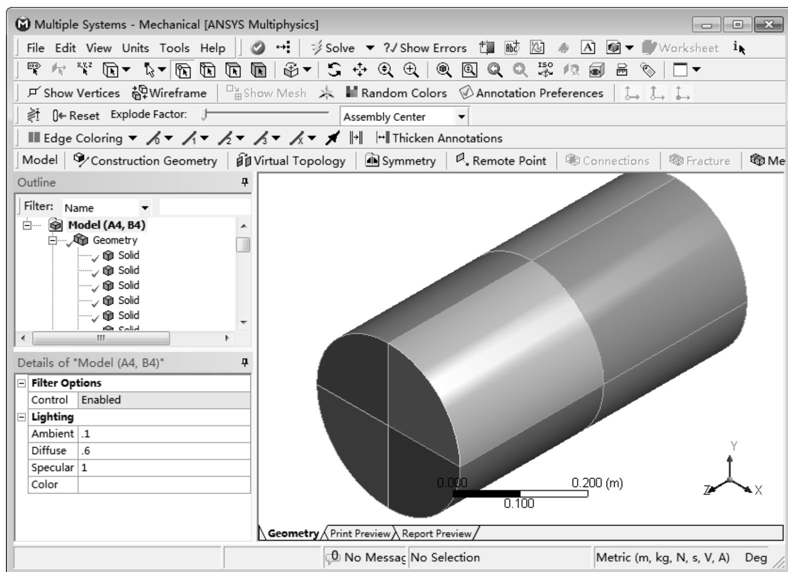


图 6-63 Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 8 个 Solid，此时即可在 Details of“Multiple Selection”（参数列表）中给模型添加材料，如图 6-64 所示。

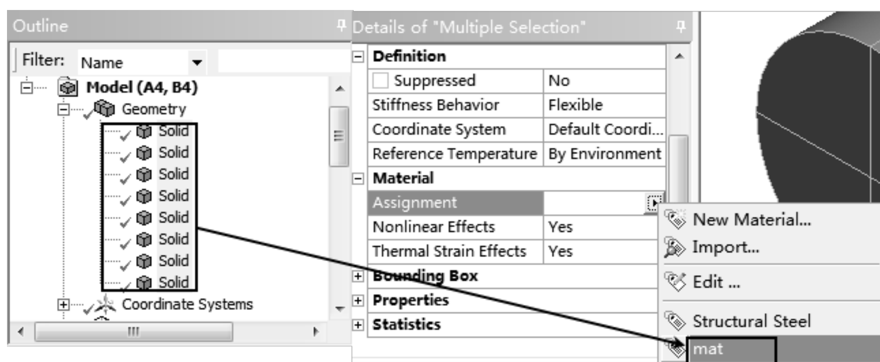


图 6-64 修改材料属性

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的 ▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

6.5.6 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置窗口的 Relevant Center 栏中选择 Fine 选项，如图 6-65 所示。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 6-66 所示。

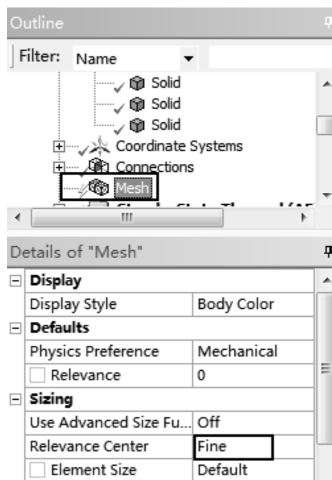


图 6-65 网格设置

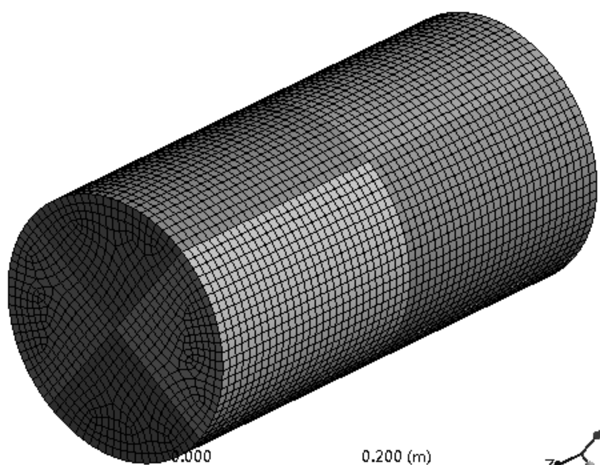


图 6-66 网格效果

6.5.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选

项，此时会出现图 6-67 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 6-68 所示。

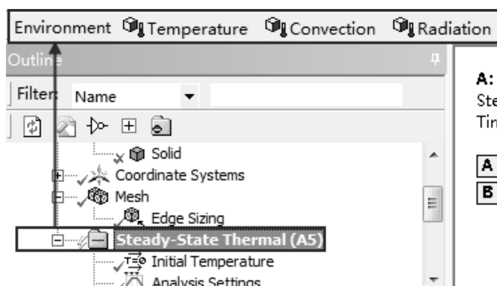


图 6-67 Environment 工具栏

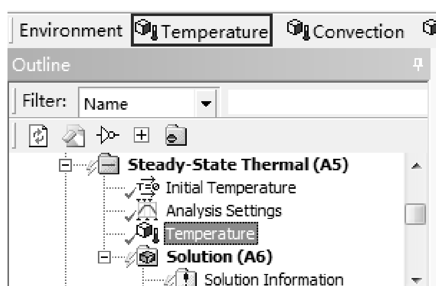


图 6-68 添加载荷

Step3：如图 6-69 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择 8 个几何体；在 Definition→Magnitude 栏中输入 20；其余默认即可，完成一个温度的添加。

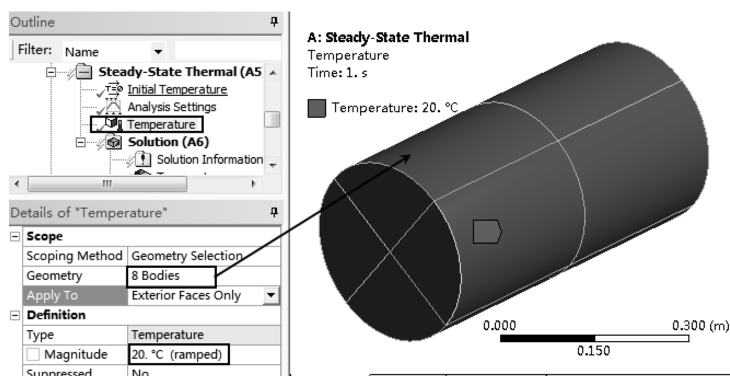


图 6-69 设置

Step4：选择 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6-70 所示。

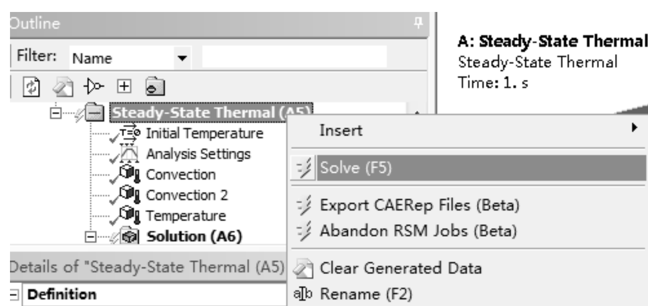


图 6-70 求解

6.5.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 6–71 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 6–72 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

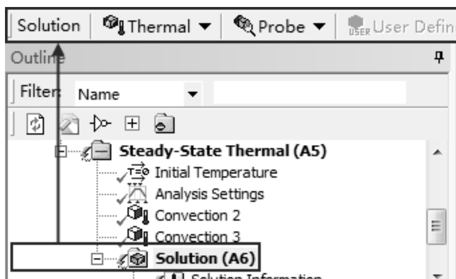


图 6–71 Solution 工具栏

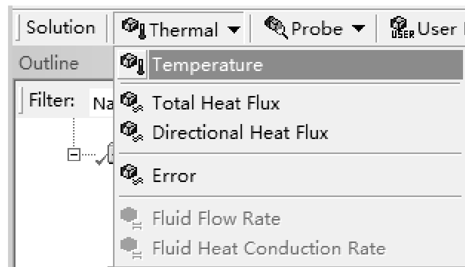


图 6–72 添加温度选项

Step3：选择 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 6–73 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 6–74 所示。

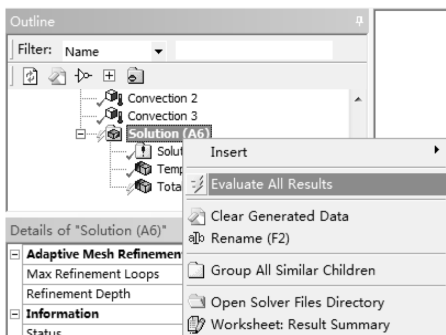


图 6–73 快捷菜单

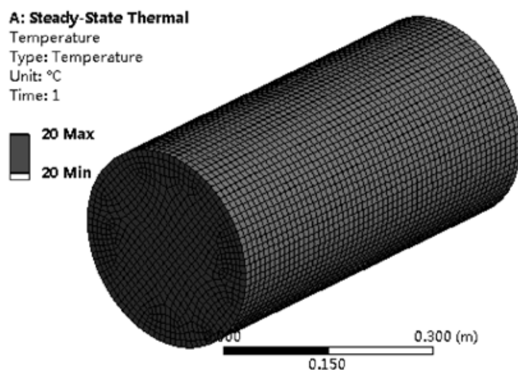


图 6–74 温度分布

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在出现图 6–75 所示的 Environment 工具栏中单击 Convection 选项。

Step6：单击 Convection 选项，然后在 Details of “Convection”设置面板中作如下设置，如图 6–76 所示：在 Geometry 栏中确保全部外表面共计 16 个面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 200；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 1020℃，其余默认即可。

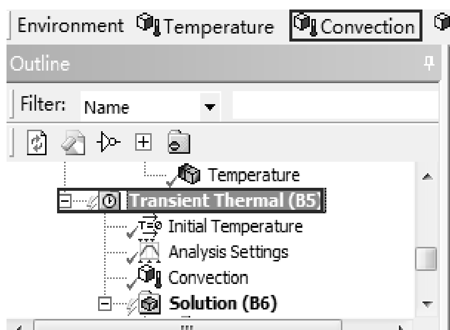


图 6-75　快捷菜单

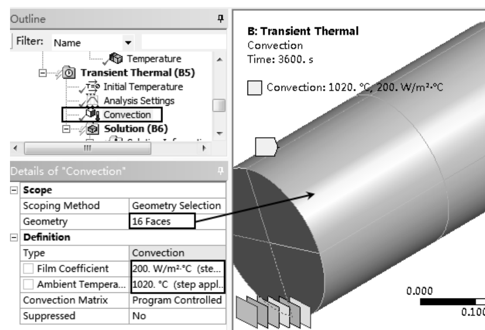


图 6-76　温度分布

Step7：设置分析选项。单击 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在图 6-77 所示的分析选项设置面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 3600s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 500，其余默认即可。

Step8：选择 Outlines（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6-78 所示。

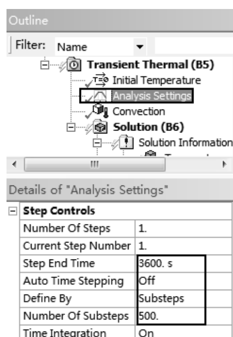


图 6-77　温度分布

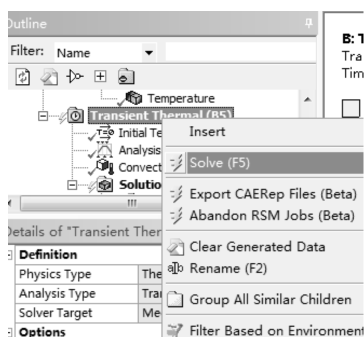


图 6-78　求解

Step9：单击 Solution→Solution Information→Temperature - Global Maximum，将显示图 6-79 所示的温度曲线图。

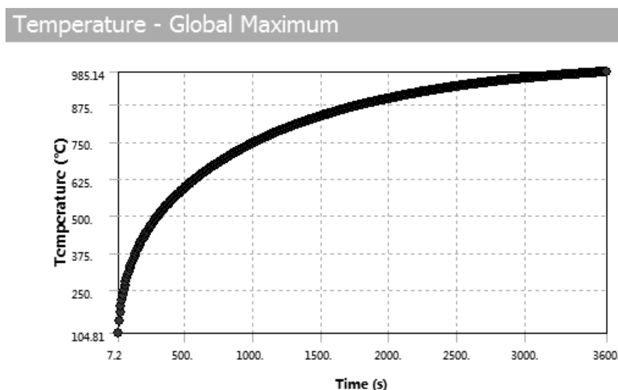


图 6-79　温度曲线图

Step10：添加一个 Temperature 后处理命令，通过后处理可以看出图 6-80 所示的各个时

刻的温度值。

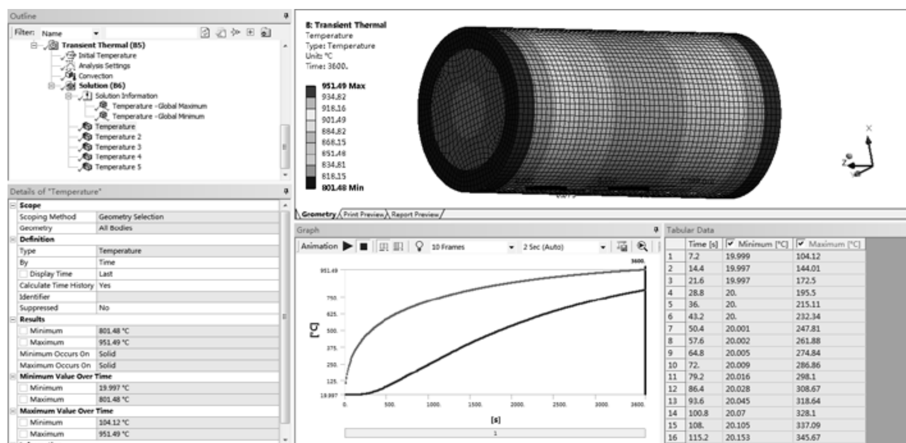


图 6-80　各时刻温度值

Step11： 根据案例四个节点的位置，在模型中分别选中四个点，然后通过添加 Temperature 命令，对四个关键节点进行温度后处理，如图 6-81～图 6-84 所示。

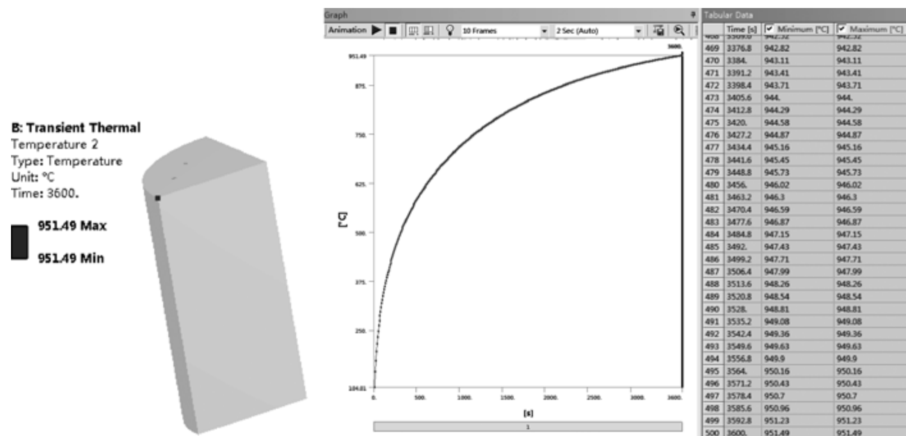


图 6-81　节点 1 温度曲线图

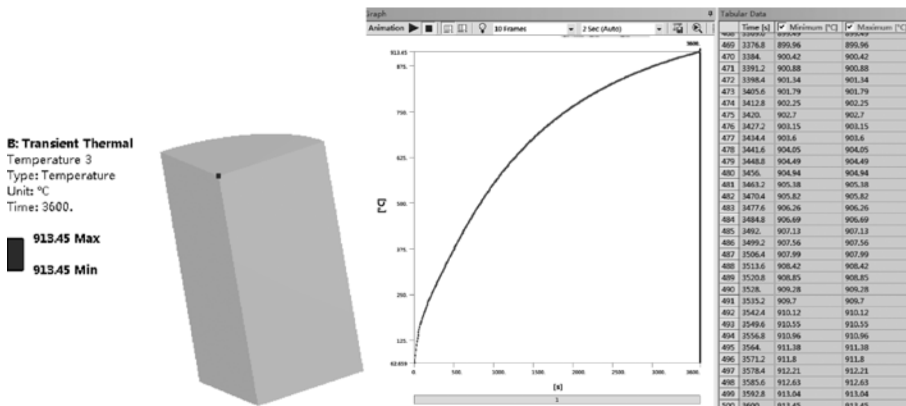


图 6-82　节点 2 温度曲线图

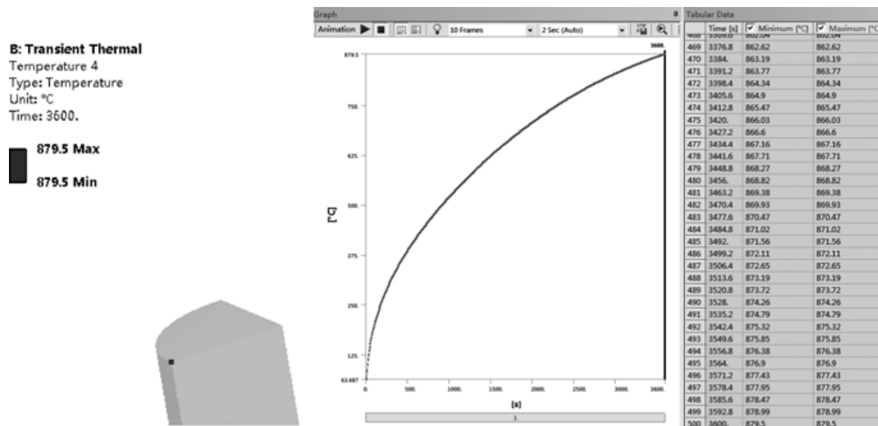


图 6-83　节点 3 温度曲线图

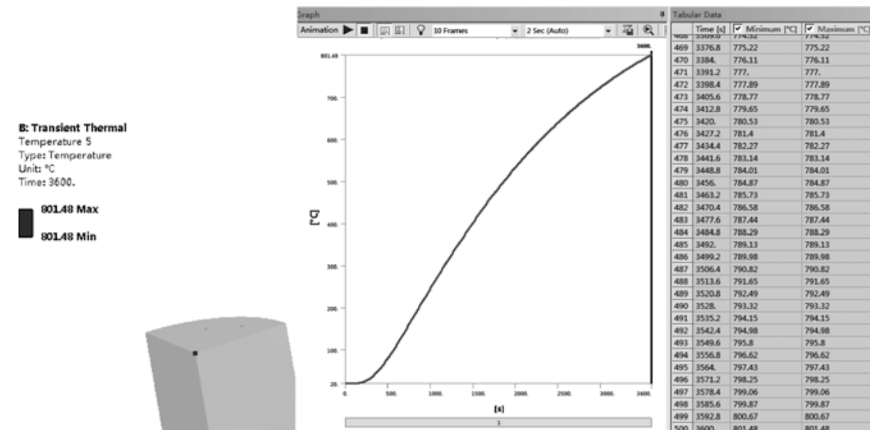


图 6-84　节点 4 温度曲线图

6.5.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

【分析】解析解与仿真解见表 6-3。

表 6-3　解析解与仿真解

结果	解析解	仿真解
位置 1	953	951.49
位置 2	915	913.45
位置 3	879	879.5
位置 4	800	801.48

从上述分析可以看出，仿真结果与解析方法算出结果的一致性很好。

6.6　本章小结



本章首先对非稳态传热理论及基本公式进行了简单的介绍，然后分别以板、圆柱及球体为例对不同情况的传热解析计算方法与仿真计算方法进行了详细的介绍，并对比了两种计算方法的计算结果。

第 7 章　非线性热分析

材料的热物性参数时时刻刻都在变化，非线性传热分析就是对此进行分析。本章主要通过一个简单的实例对非线性传热的分析方法进行简单介绍，读者通过对每一个步骤的学习，体会非线性热学分析的有限元分析方法。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
非线性热分析操作方法		√	√	√
非线性热分析的应用领域		√	√	√

7.1　非线性热分析概述

从前面章节可以看出，线性系统热分析的控制方程可以写成以下形式的矩阵方程：

$$\{\boldsymbol{C}\}\{\dot{\boldsymbol{T}}\}+\{\boldsymbol{K}\}\{\boldsymbol{T}\}=\{\boldsymbol{Q}\} \tag{7-1}$$

式中，$\{\boldsymbol{C}\}$为比热矩阵；$\{\boldsymbol{K}\}$为传导矩阵；$\{\boldsymbol{T}\}$为温度向量；$\{\dot{\boldsymbol{T}}\}$为温度向量；$\{\boldsymbol{Q}\}$为节点热流率向量。

如果式（7−1）中的一些数值是随着温度变化而变化的，那么系统就变成了非线性系统，此时必须用迭代法进行求解，而上述方程式变成：

$$\{\boldsymbol{C}(\boldsymbol{T})\}\{\dot{\boldsymbol{T}}\}+\{\boldsymbol{K}(\boldsymbol{T})\}\{\boldsymbol{T}\}=\{\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T})\} \tag{7-2}$$

如果式（7−2）中的载荷同样随着时间变化而变化，那么式（7−2）就变成了瞬态非线性分析。本章将通过一个典型的案例对非线性热分析的基本过程进行详细介绍。

7.2　非线性热分析案例——平板非线性热分析

本案例主要通过仿真的方法讲解平板结构非线性热分析的一般操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中非线性热分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter7\char07−1\non_linear.wbpj

7.2.1　案例描述

某金属平板尺寸为 120mm×80mm×4mm，如图 7−1 所示，密度为 2500kg/m^3，上下表面的对流换热系数为180W/(m^2·K)，4 个侧面边界为90W/(m^2·K)，其他参数，如比热、导热率均随温度变化。 现将此金属板加热到 600℃并突然放置到 20℃的空气中进行淬冷，忽略热

传导和热辐射，将传热过程简化为对流传热，求其淬冷过程中的热分布变化情况。其材料参数见表 7-1。

表 7-1　材料属性表

温度/　℃	20	100	200	300	400	500	600
比热/ J·(kg·℃)$^{-1}$	720	838	946	1036	1084	1108	1146
导热率/ W·(m·K)$^{-1}$	1.38	1.47	1.55	1.67	1.84	2.04	2.46

7.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，右键单击 A6 创建一个 Transient Thermal（瞬态热分析），即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目，如图 7-2 所示。



图 7-1　模型

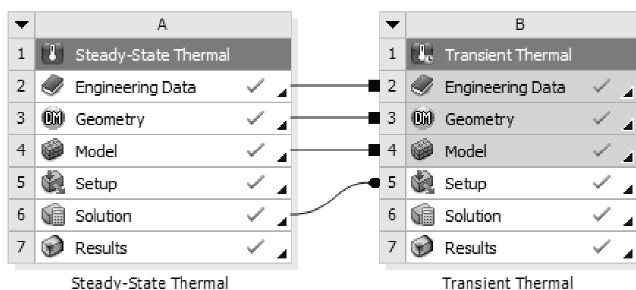


图 7-2　创建分析项目

7.2.3 创建几何体模型

Step1： 在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 7-3 所示。

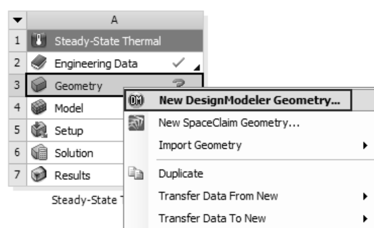


图 7-3　导入几何体

Step2： 在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，依次选择菜单在坐标原点创建一个矩形，并将矩形的两条边分别设置为 120mm 和 80mm 如图 7-4 所示。

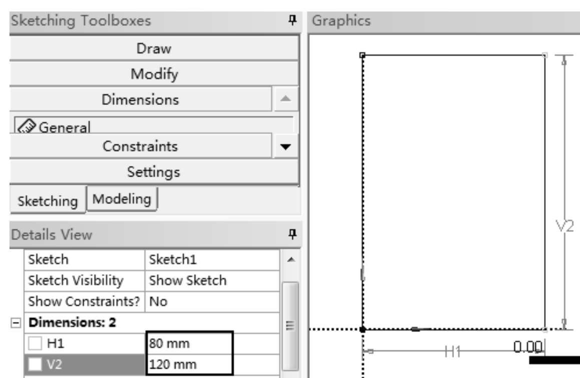


图 7-4　草绘

Step3：选择工具栏中的 Extrude 命令，在弹出的图 7-5 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选择刚才建立的草绘 Sketch1；在 FD1,Depth（>0）栏中输入厚度为 4mm，其余默认即可，并单击工具栏中的 Generate 命令生成几何。

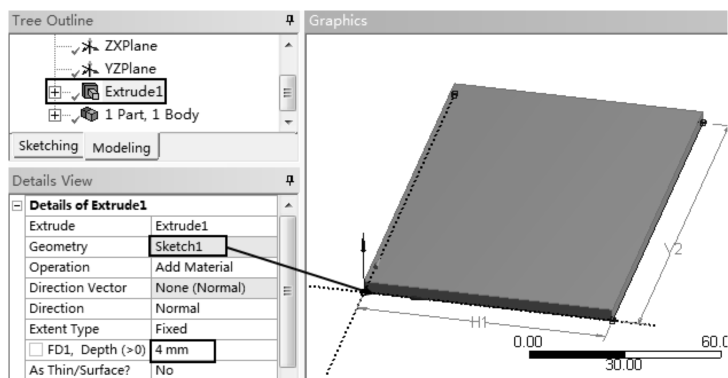


图 7-5　设置

Step4：单击工具栏中的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的“名称”栏中输入 non_linear.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

7.2.4 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data，进入 Mechanical 热分析的材料设置界面。

Step2：在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧的 Toolbox 栏中选择 Density（密度）并直接拖曳到 mat 中，此时在 Properties of Outline Row 4：mat 下面的 Density 中输入 2500。

由于 Isotropic Thermal Conductivity 和 Specific Heat 两个属性是随温度变化的，所以需要通过表格进行设置，如图 7-6 所示。

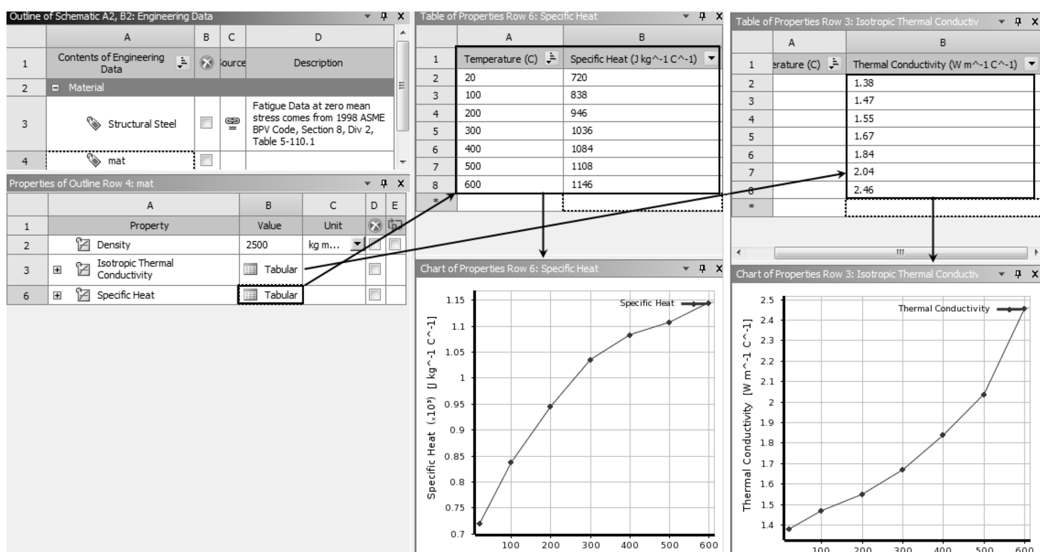


图 7-6　设置材料热属性

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B4：Model 项，进入图 7-7 所示的 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

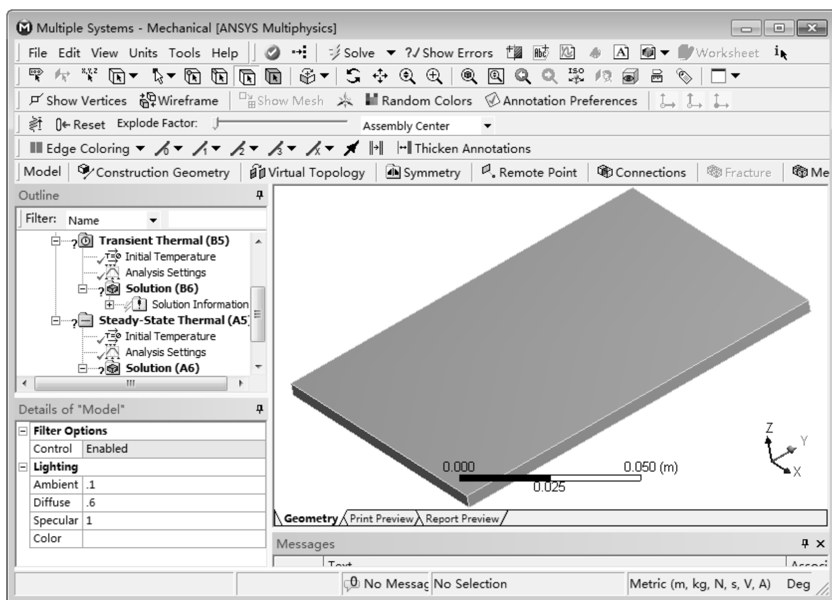


图 7-7　Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 7-8 所示。

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

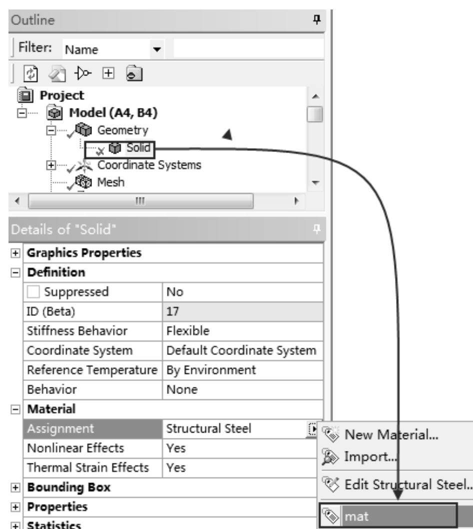


图 7-8 修改材料属性

7.2.5 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置面板的 Element Size 栏中输入 1.e-003m，如图 7-9 所示。

Step2：选择 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 7-10 所示。

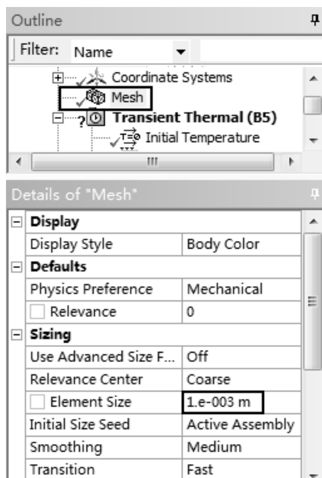


图 7-9 网格设置

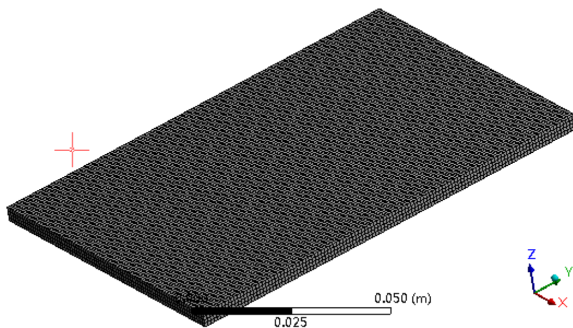


图 7-10 网格效果

7.2.6 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 7-11 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 7-12 所示。

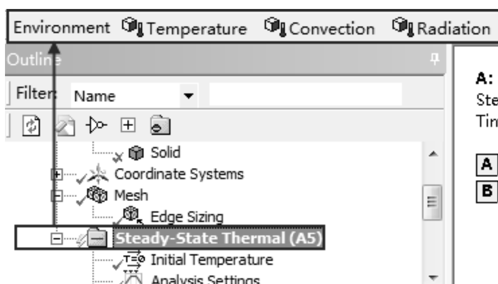


图 7-11 Environment 工具栏

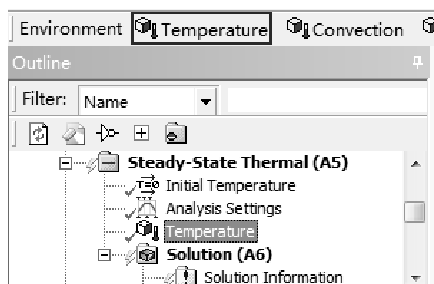


图 7-12 添加载荷

Step3：如图 7-13 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择球体；在 Definition→Magnitude 栏中输入 600；其余默认即可，完成一个温度的添加。

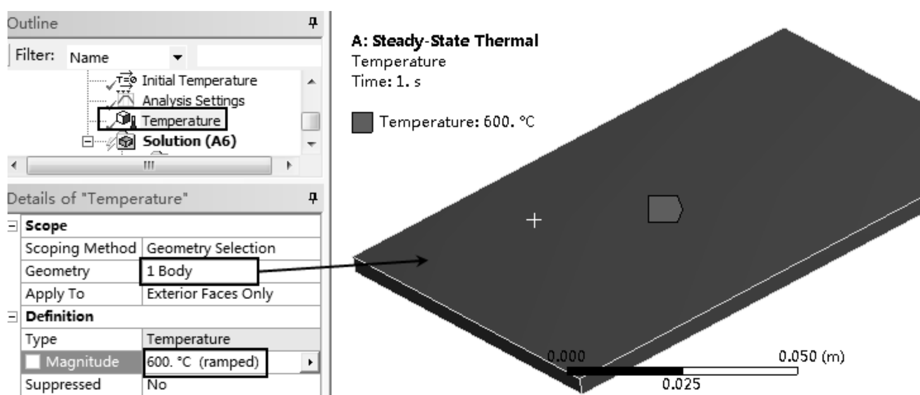


图 7-13 设置温度参数

Step4：选择 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 7-14 所示。

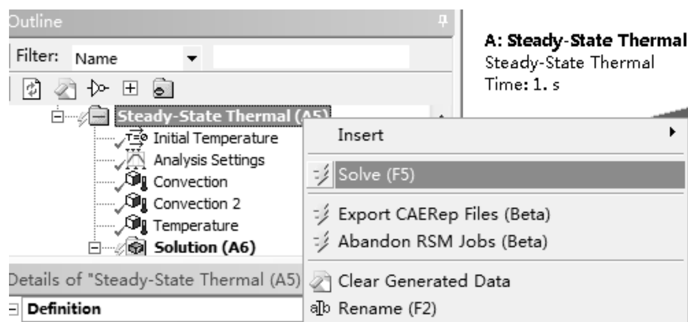


图 7-14 求解



7.2.7 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 7-15 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature（温度）命令，如图 7-16 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

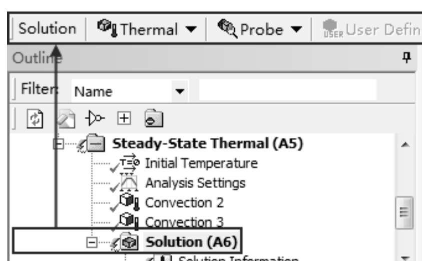


图 7-15　Solution 工具栏

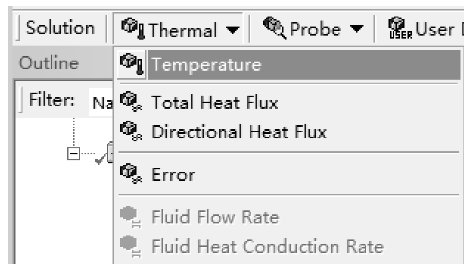


图 7-16　添加温度选项

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Evaluate All Results 命令，如图 7-17 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），结果如图 7-18 所示。

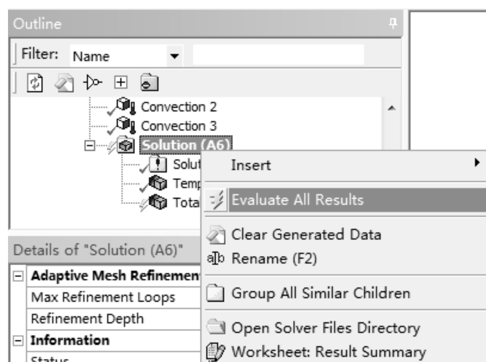


图 7-17　快捷菜单

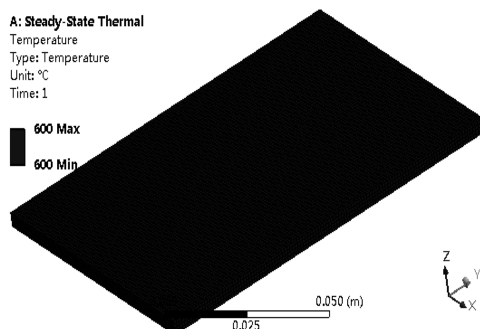


图 7-18　温度分布

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在出现的 Environment 工具栏中单击两次 Convection 选项。

Step6：单击 Convection 选项，然后在 Details of “Convection”面板中作如下设置，如图 7-19 所示：在 Geometry 栏中确定上下两个表面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 180；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 20℃，其余默认即可。

Step7：单击 Convection2 选项，然后在 Details of “Convection2”面板中作图 7-20 所示

的设置：在 Geometry 栏中确定四周四个表面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 90；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 20℃，其余默认即可。

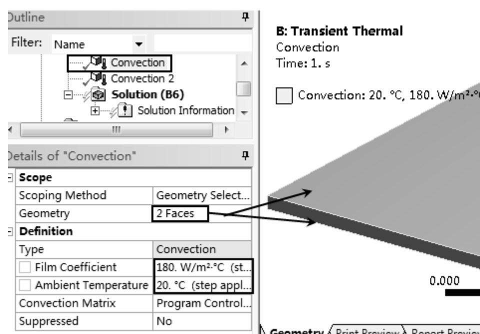


图 7−19　对流 1

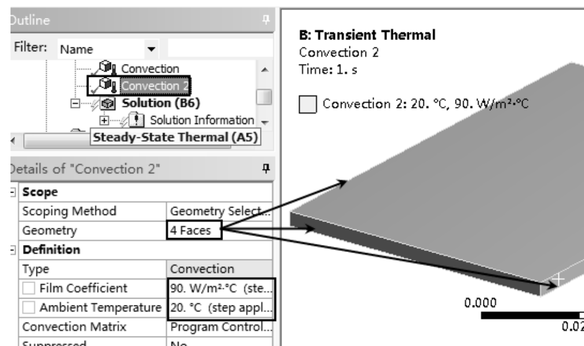


图 7−20　对流 2

Step8：设置分析选项。单击 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在图 7−21 所示的 Details of“Analysis Setting”面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 10s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 200，其余默认即可。

Step9：选择 Outlines（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 7−22 所示。

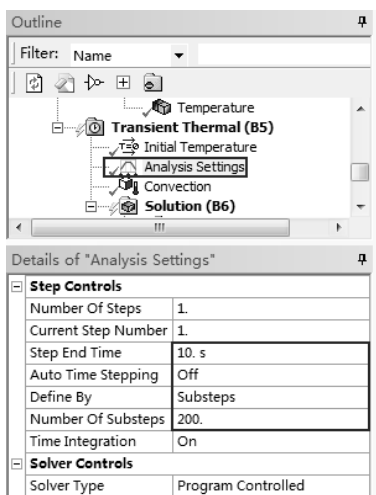


图 7−21　温度分布

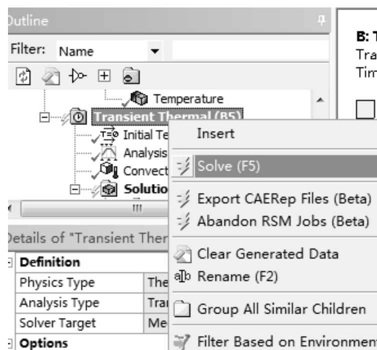


图 7−22　求解

Step10：单击 Solution → Solution Information → Temperature-Global Maximum 和 Temperature-Global Minimum，将显示图 7−23 所示的降温曲线图，从图 7−23 中可以看出，在 10s 内，板的最大温度降到了 460.2℃，最小温度降到了 324.69℃，如果想将温度降到环境温度（即 20℃），还需要一段时间。

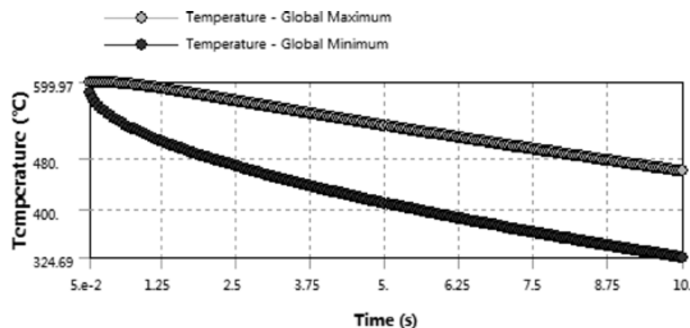


图 7−23　降温曲线图

Step11：添加一个 Temperature 后处理命令，通过后处理可以看出图 7−24 所示的在时间为 10s 的温度分布云图。

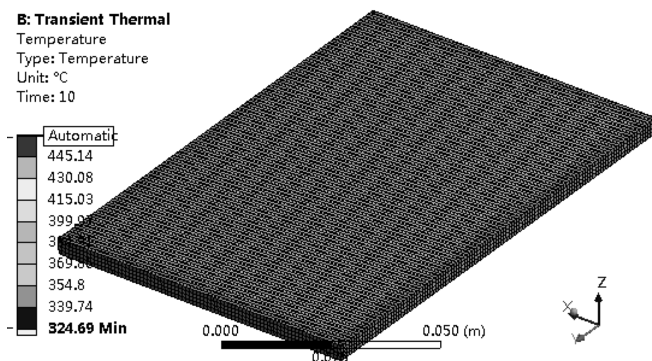


图 7−24　10s 内各个时刻的温度分布云图

Step12：通过云图右下角的 Tubular Table（见图 7−25），能精确地查到每个时间点上的温度变化值。

Tabular Data

	Time [s]	Temperature - Global Maximum [°C]		Time [s]	Temperature - Global Maximum [°C]		Time [s]	Temperature - Global Maximum [°C]
1	5.e-002	599.97	30	1.5	586.84	59	2.95	563.78
2	0.1	599.97	31	1.55	586.07	60	3.	562.98
3	0.15	599.94	32	1.6	585.29	61	3.05	562.17
4	0.2	599.88	33	1.65	584.52	62	3.1	561.37
5	0.25	599.8	34	1.7	583.75	63	3.15	560.57
6	0.3	599.7	35	1.75	582.97	64	3.2	559.77
7	0.35	599.57	36	1.8	582.18	65	3.25	558.97
8	0.4	599.39	37	1.85	581.4	66	3.3	558.16
9	0.45	599.16	38	1.9	580.61	67	3.35	557.36
10	0.5	598.89	39	1.95	579.81	68	3.4	556.56
11	0.55	598.57	40	2.	579.02	69	3.45	555.78
12	0.6	598.2	41	2.05	578.22	70	3.5	554.99
13	0.65	597.79	42	2.1	577.42	71	3.55	554.21
14	0.7	597.34	43	2.15	576.61	72	3.6	553.43
15	0.75	596.85	44	2.2	575.81	73	3.65	552.65
16	0.8	596.33	45	2.25	575.	74	3.7	551.86
17	0.85	595.77	46	2.3	574.19	75	3.75	551.08
18	0.9	595.19	47	2.35	573.38	76	3.8	550.3
19	0.95	594.59	48	2.4	572.57	77	3.85	549.52
20	1.	593.96	49	2.45	571.76	78	3.9	548.73
21	1.05	593.31	50	2.5	570.96	79	3.95	547.95
22	1.1	592.64	51	2.55	570.17	80	4.	547.17
23	1.15	591.96	52	2.6	569.37	81	4.05	546.38
24	1.2	591.27	53	2.65	568.57	82	4.1	545.6
25	1.25	590.56	54	2.7	567.77	83	4.15	544.82
26	1.3	589.83	55	2.75	566.98	84	4.2	544.03
27	1.35	589.1	56	2.8	566.18	85	4.25	543.25
28	1.4	588.35	57	2.85	565.38	86	4.3	542.47
29	1.45	587.6	58	2.9	564.58	87	4.35	541.68

图 7−25　不同时刻温度图标

7.2.8 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含分析结果的文件。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

7.3 本章小结

本章通过一个典型的平板案例，以在 ANSYS Workbench 平台中的操作流程为主线，进行了详细的分析与介绍，希望读者通过对本章节的深入学习和对操作流程的体会，能对非线性热分析理论拥有深入的理解。

第 8 章　热辐射分析

在供热、燃气与空调工程中存在着大量热辐射和辐射换热的问题，如辐射采暖、辐射干燥、利用辐射原理测量温度、炉内辐射换热的分析和计算等。当前在新能源开发方面，对太阳能的利用引起了人们的注意，这其中也涉及热辐射。在本章中，将首先介绍热辐射的基本概念，然后讨论热辐射的几个基本定律，最后通过案例介绍如何在 Workbench 平台中实现辐射仿真计算。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
热辐射分析的基本概念	√	√		
热辐射分析操作方法		√	√	√
热辐射分析的应用领域		√	√	√

8.1　基本概念

8.1.1　热辐射的本质和特点

热辐射能是各类物质的固有特性。物质是由分子、原子、电子等基本粒子组成的，当原子内部的电子受激发和振动时，会产生交替变化的电场和磁场，发出电磁波向空间传播，这就是辐射。由于激发的方法不同，所产生的电磁波波长不相同，它们投射到物体上产生的效应也不同。由于自身温度或热运动的原因而激发产生的电磁波传播，就是热辐射。电磁波的波长范围可从几万分之一微米到数千米。它们的名称和分类如图 8–1 所示。

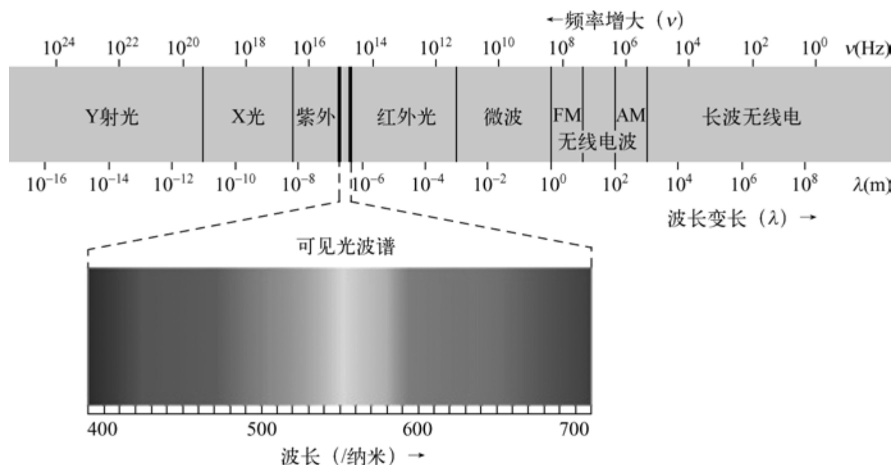


图 8–1　电磁波谱

凡是波长λ在 0.38～0.76μm 范围内的电磁波均属于可见光线；波长$\lambda < 0.38\mu m$的电磁波是紫外线、伦琴射线等；λ在 0.76～1000μm 范围的电磁波称为红外线，红外线又分近红外和远红外，大体上以 25μm 为界限，波长在 25μm 以下的红外线称为近红外线，25μm 以上的红外线称为远红外线；$\lambda > 1000\mu m$的电磁波是无线电波。通常把λ在 0.1～100μm 范围的电磁波称为热射线，其中包括可见光线、部分紫外线和红外线，它们投射到物体上能产生热效应。当然，波长与各种效应是不能截然划分的。工程上遇到的温度一般在 2000K 以下，热辐射的大部分能量位于红外线区段的 0.76～20μm 波长范围内，在可见光区段内热辐射能所占的比重不大。显然，当热辐射的波长大于 0.76μm 时，将无法被人眼睛看见。太阳辐射的主要能量集中在 0.2～2μm 波长范围，其中可见光区段占有很大比重。

辐射的本质及其传播过程中的波动性可用经典的电磁波理论说明，其粒子性又可用量子理论来解释。各种电磁波在介质中的传播速度等于光速，即：

$$c = \lambda v \tag{8-1}$$

式中，c为介质中的光速，λ为波长，v为频率。量子理论认为辐射是离散的量子化能量束，即光子传播能量的过程。光子的能量e与频率v的关系可用普朗克公式表示：

$$e = hv \tag{8-2}$$

式中，h为普朗克常数，$h = 6.63\times10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$。

热辐射的本质决定了热辐射过程有如下三个特点：

（1）辐射换热与导热、对流换热不同，它不依赖物体的接触面进行热量传递，如阳光能够穿越辽阔的低温太空向地面辐射；而导热和对流换热都必须由冷、热物体直接接触或通过中间介质相接触才能进行。

（2）辐射换热过程伴随着能量形式的两次转化，即物体的部分内能转化为电磁波能发射出去，当此波能射及另一物体表面而被吸收时，电磁波能又转化为内能。

（3）一切物体只要温度大于绝对 0K，都会不断地发射热射线。当物体间有温差时，高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体辐射给高温物体的能量，因此总的结果是高温物体把能量传给低温物体。即使各个物体的温度相同，辐射换热仍在不断进行，只是每一物体辐射出去的能量等于吸收的能量，因此处于动平衡状态。

8.1.2 吸收、反射和投射

当热射线投射到物体上时，遵循着可见光的规律，其中一部分被物体吸收，一部分被反射，其余则透过物体τ，如图 8-2 所示。设投射到物体上全波长范围的总能量为G，被吸收能量G_α，反射能量为G_ρ，透射能量为G_τ，根据能量守恒定律可知：

$$G = G_\alpha + G_\rho + G_\tau$$

若等式两边同除以G，则：

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{8-3}$$

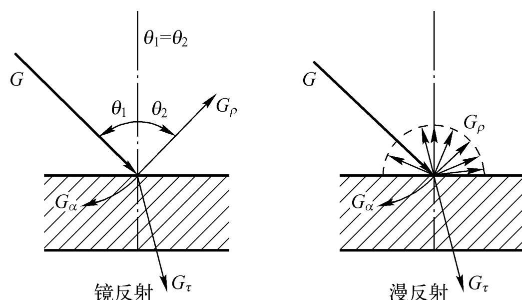


图 8-2　热射线的吸收、反射和透射

式中$\alpha=\dfrac{G_\alpha}{G}$，称为物体的吸收率，表示投射的总能量中被吸收的能量所占份额；

$\rho=\dfrac{G_\rho}{G}$，称为物体的反射率，表示投射的总能量中被反射的能量所占份额；

$\tau=\dfrac{G_\tau}{G}$，称为物体的透射率，表示投射的总能量中透射的能量所占份额。

如果投射能量是某一波长下的单色辐射，上述关系也同样适用，即：

$$\alpha_\lambda+\rho_\lambda+\tau_\lambda=1 \tag{8-4}$$

式中，α_λ、ρ_λ、τ_λ分别为单色吸收率、单色反射率和单色透射率。

α、ρ、τ和α_λ、ρ_λ、τ_λ是物体表面的辐射特性，它们和物体的性质、温度及表面状况有关。对全波长的特性α、ρ、τ还和投射能量的波长分布情况有关。

热射线进入固体或液体表面后，在一个极短的距离内就被完全吸收。对于金属导体，这个距离仅有1μm 的数量级；对于大多数非导电体材料，这个距离也小于 1mm。所以，可认为热射线不能穿透固体、液体，即$\tau=0$。于是，对于固体和液体，式（8-3）可简化为：

$$\alpha+\rho=1 \tag{8-5}$$

因而，吸收率越大的固体和液体，其反射率就越小，而吸收率越小的固体和液体，其反射率就越大。固体和液体对热射线的吸收和反射几乎都在表面进行，因此物体表面情况对其吸收和反射特性的影响至关重要。

热射线投射到物体表面后的反射现象和可见光一样，有反射和漫反射之分。当表面的不平整尺寸小于投射辐射的波长时，形成镜面反射，反射角等于入射角。高度磨光的金属表面是镜面反射的实例。当表面的不平整尺寸大于投射辐射的波长时，形成漫反射，此时反射能均匀分布在各个方向。一般工程材料的表面较粗糙，故接近漫反射。

热射线投射到气体界面上时，可被吸收和透射，而几乎不反射，即$\rho=0$。于是，对于气体，式（8-3）可简化为：

$$\alpha+\tau=1 \tag{8-6}$$

显然，透射性好的气体吸收率小，而透射性差的气体吸收率大。气体的辐射和吸收是在整个气体容积中进行的，气体的吸收和穿透特性与气体内部特征有关，与其表面状况无关。

如物体能全部吸收外来射线，即$\alpha=1$，则这种物体被定义为黑体。如果物体能全部反射外来射线，即$\rho=1$，不论是镜面反射或漫反射，均称为白体。如果物体能被外来射线全部透射，即$\tau=1$，则称为透明体。

自然界中并不存在黑体、白体与透明体，它们只是实际物体热辐射性能的理想模型。例如烟煤的$\alpha \approx 0.96$，高度磨光的纯金$\rho \approx 0.98$。必须指出，这里的黑体、白体、透明体是对全波长射线而言。在一般温度条件下，由于可见光在全波长射线中只占一小部分，所以物体对外来射线吸收能力的高低，不能凭借物体的颜色来判断，白颜色的物体不一定是白体。例如，雪对可见光是良好的反射体，它对肉眼来说是白色的，但对红外线却几乎能全部吸收，非常接近黑体；白布和黑布对可见光的吸收率不同，对于红外线的吸收率却基本相同；普通玻璃对波长小于2μm射线的吸收率很小，从而可以把照射到它上面的大部分太阳能投射过去，但玻璃对2μm以上的红外线几乎是不透明的。

8.2 热辐射案例——空心半球与平板的热辐射

下面通过一个案例来讲解如何使用 ANSYS Workbench 热分析模块进行热辐射分析，读者重点学习 Workbench 平台中进行热辐射分析的一般步骤。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中热辐射分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter8\char08-1\refushe.wbpj

8.2.1 案例介绍

图 8-3 所示的几何结构是两个直径为 2m 的半圆盘，两个半圆盘之间的净距离为 50mm，上面是一个内半径为 1m、壁厚为 200mm 的空心半球体，半球体与两个半圆盘的净距离也是 50mm，三个几何模型的导热系数均为 1.7367E-07 W/(m·K)，试分析当其中一个半圆盘上表面温度为 200℃、另一个半圆盘上表面温度为 40℃时，通过辐射传热整体结构的热分布情况。

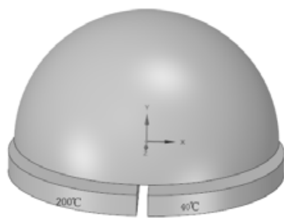


图 8-3 几何模型

注：本算例采用ANSYS SpaceClaim平台建模，在这里不详细对建模进行介绍，请读者参考前面章节的内容学习建模方法。

8.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

首先打开 ANSYS Workbench 17.0 程序。在项目工程管理窗口中建立图 8-4 所示的稳态热分析项目流程表。

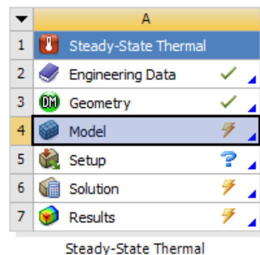


图 8-4 项目管理

8.2.3 定义材料参数

Step1： 双击 A2：Engineering Data，首先对模型的材料属性进行定义。

Step2： 在 B2 栏中输入材料名称为 MINE，在下面的 Properties of Outline Row 3：MINE 中添加 Isotropic Thermal Conductivity 选项，并输入数值为 1.7367E-07，单位默认即可，如

图 8-5 所示。

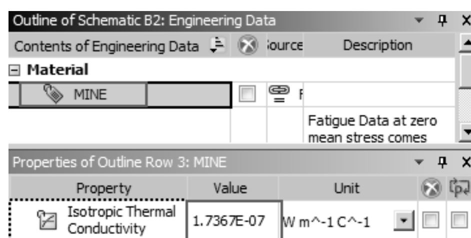


图 8-5　选择材料

Step3：材料选择完成后单击 Return to Project（回到项目管理区）按钮。

8.2.4 导入模型

Step1：右键选择 A3：Geometry（模型），在弹出的快捷菜单中选择 Insert 命令，在弹出的几何文件对话框中导入 fushe.stp 格式的几何。

Step2：双击进入 DM 几何建模平台，在工具栏中选择 Generate 命令，此时在 DM 平台中将显示图 8-6 所示的几何模型。

8.2.5 划分网格

Step1：双击项目文件 A4：Model（网格），由于 Workbench 平台中导入的几何模型的默认格式为冻结状态，所以显示出来的几何模型为半透明状态，如果导入的几何模型为解冻状态（一般状态）的话，所显示的几何模型应该是不透明状态。

Step2：依次选择 Model（A4）→Geometry 下面的三个几何模型（三个几何同时选中），单击 Assignment 栏中的▶按钮，此时在弹出的快捷菜单中选择 MINE 选项，即将 MINE 材料属性赋予几何模型，如图 8-7 所示，当几何材料属性被选中后，在 Assignment 栏中将显示 MINE。

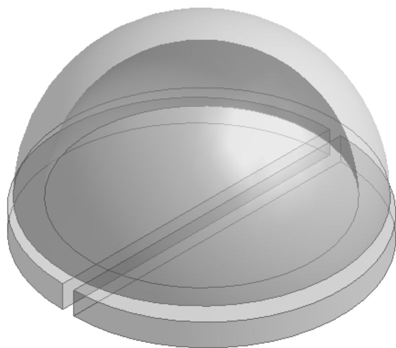


图 8-6　模型

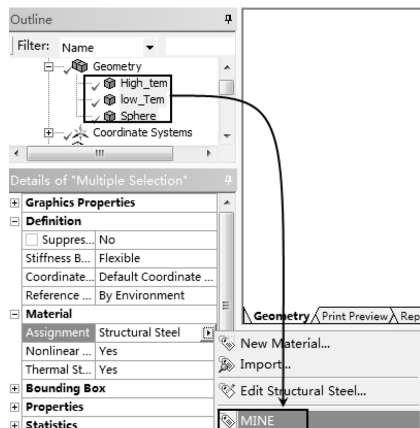


图 8-7　材料属性

Step3：在 Outline 栏中单击 Mesh 选项，此时在 Outline 栏的正下方将出现图 8-8 所示的 Details of “Mesh”详细设置面板，在窗口中 Sizing 下面的 Element Size 栏中输入 5.e-

002m，表示设置几何网格尺寸大小为 50mm，软件会根据设置的网格大小划分网格。

Step4：右键选择 Mesh，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，经过一段时间后，划分完的网格如图 8-9 所示，从网格图中可以看出，下面的两个半圆盘网格以六面体网格为主，空心半球体几何的网格以四面体网格为主。

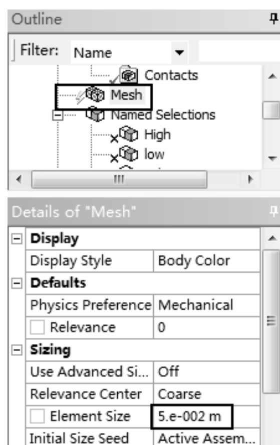


图 8-8　网格大小

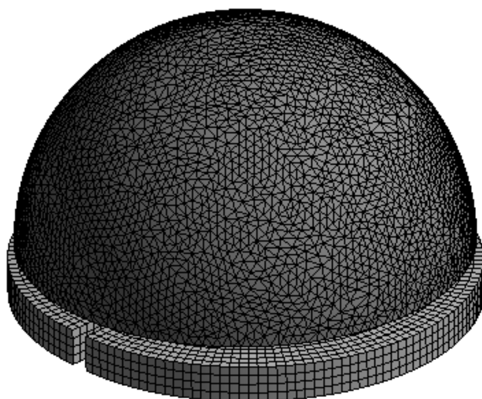


图 8-9　划分网格

Step5：移动 Details of “Mesh”窗口中右侧的滑条到最下方，此时可以看到 Statistic（统计）属性，其中显示出当前几何的总节点数为 97899 个，总单元数为 39981 个，在 Mesh Metric 栏中选择 Skewness 选项，此时在右侧的 Mesh Metric 窗口中显示出当前几何模型剖分网格的质量，如图 8-10 所示，同时在 Details of “Mesh”面板的最下面四行中分别显示出最小单元质量、最大单元质量、平均单元质量及标准等信息。关于网格质量的判断请读者阅读本书的前面章节，这里不再赘述。

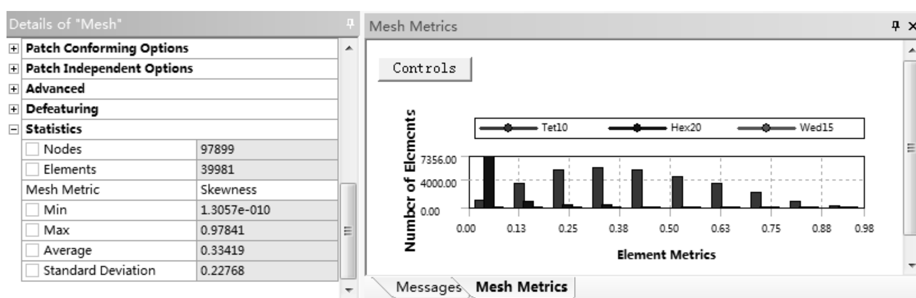


图 8-10　网格数量及质量

Step6：对几何表面进行命名。在 Workbench 平台中的 Mechanical 进行热辐射计算时，通过单击工具栏中的相关命令仅能完成几何体对空气的辐射设置，还不能进行两个或者多个几何体之间的热辐射设置，所以这里必须通过插入 APDL 命令行进行设置，而插入命令行进行操作时需要选择相关几何模型上的节点（或者面），最简单的办法就是先给需要考虑热辐射的面进行命名，然后通过 APDL 命令输入该面的名称。首先选择名称为 High_tem 的几何体的上表面，此时上表面处于加亮状态，然后右键单击绘图窗口，在弹出的快捷菜单中选择

Crete Named Selection 选项，在对话库中输入 High（注意：此位置不能通过复制粘贴完成），并单击 OK 按钮，如图 8–11 所示。

Step7：以同样的操作选择名称为 low_tem 的几何体的上表面，并将名字命名为 low，如图 8–12 所示，单击 OK 按钮。

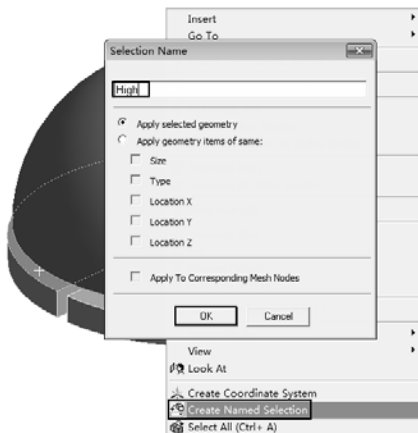


图 8–11　命名 High

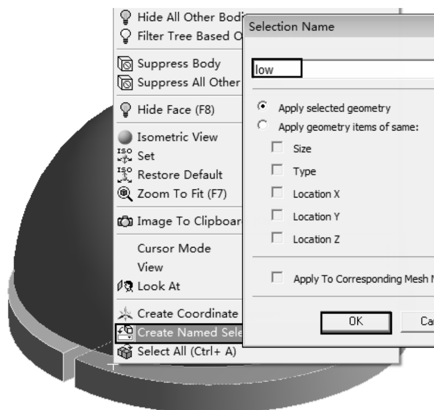


图 8–12　命名 Low

Step8：在 Outline 窗口中的选中 low_tem 几何体，并单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide Body（F9）选项，将 low_tem 几何体隐藏，如图 8–13 所示。

注意：通过分析三个几何体的相对位置可知，上面的空心半球体的内表面不容易选中，所以最好的办法是先将其中一个下面的半圆盘几何体隐藏。

Step9：选择名称为 Sphere 的空心半球体的内表面，并将名字命名为 sph，如图 8–14 所示，单击 OK 按钮。

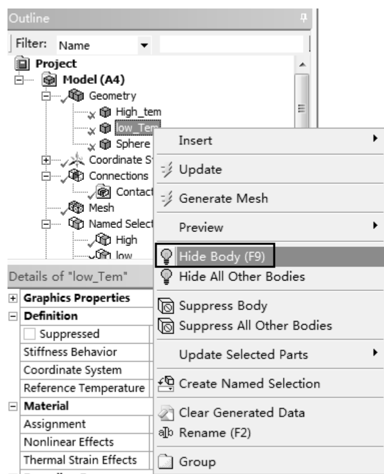


图 8–13　快捷菜单

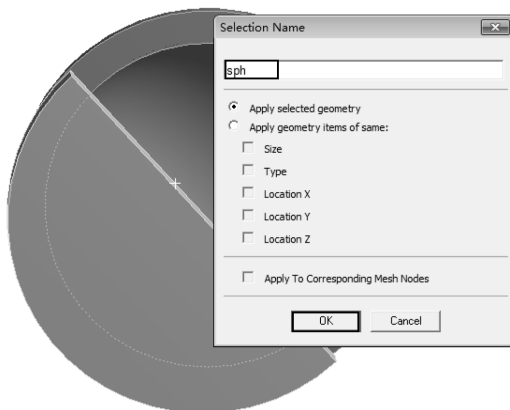


图 8–14　命名

Step10：命名完成后，左侧的 Outline 窗口的模型树中出现图 8–15 所示的 Named

Selection（命名选择）选项，并在选项中出现了刚才命名的三个名称，此时表示命名操作成功建立。

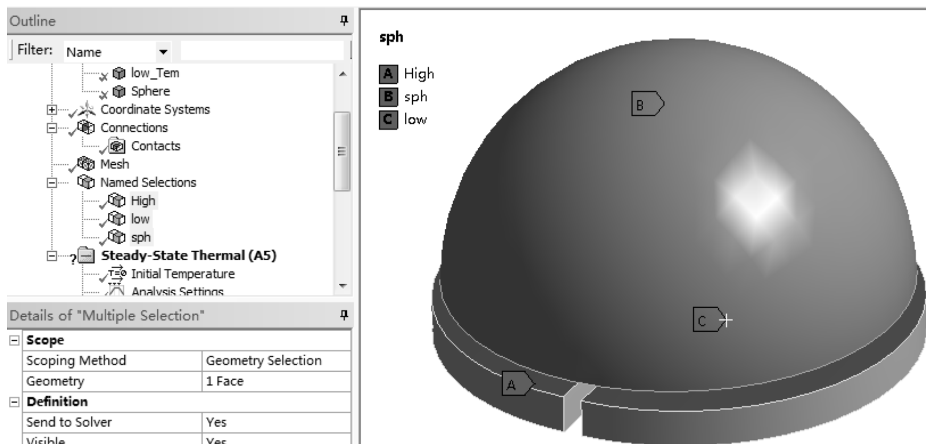


图 8-15　命名选择

注意：命名的目的是为了在后面插入命令时，方便选取面，请读者在完成后面分析后，体会一下本操作的用处。

8.2.6 定义荷载

Step1：单击 Steady-State Thermal（A5）选项，在工具栏中的 Thermal 选项中选择 Perfect Insulation（绝热）命令，此时在模型树中出现了 Heat Flow（热流密度）选项，单击此选项，并在 Geometry 栏中保证空心半球体外表面被选中，如图 8-16 所示。

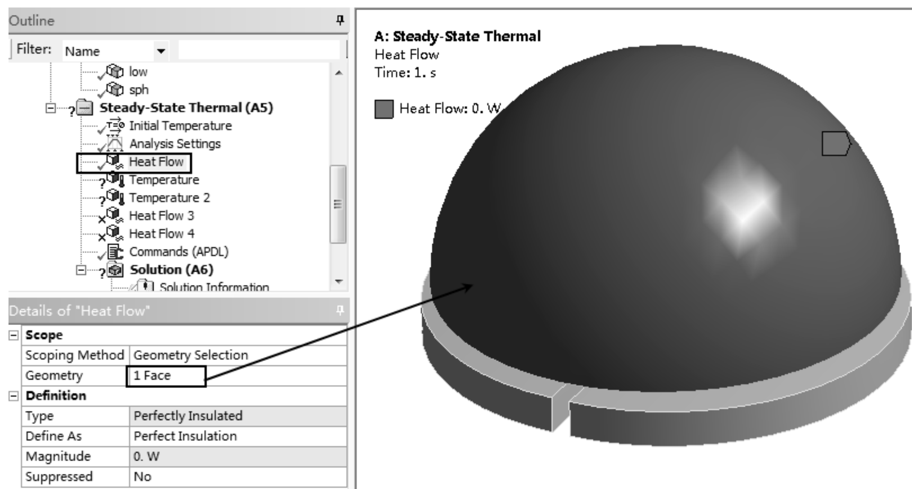


图 8-16　绝热

Step2：单击 Steady-State Thermal（A5）选项，在工具栏中的 Thermal 选项中选择

Temperature（温度）命令，此时在模型树中出现了 Temperature（温度）选项，单击该选项，在 Geometry 栏中保证 High 表面被选中，在 Definition→Magnitude 栏中输入温度为 200℃，如图 8-17 所示。

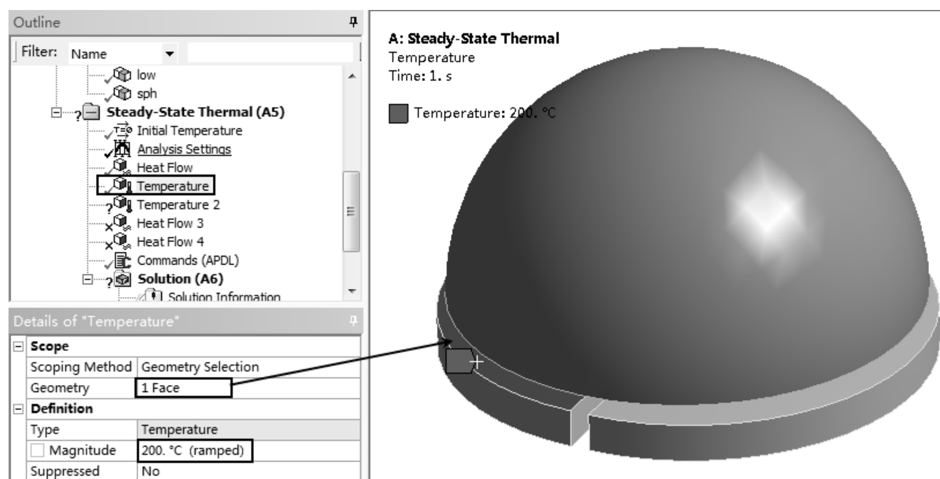


图 8-17　设置温度参数（1）

Step3：再次单击 Steady-State Thermal（A5）选项，在工具栏中的 Thermal 选项栏中选择 Temperature（温度）命令，此时在模型树中出现了 Temperature 2（温度）选项，单击该选项，在 Geometry 栏中保证 low 表面被选中，在 Definition→Magnitude 栏中输入温度为 40℃，如图 8-18 所示。

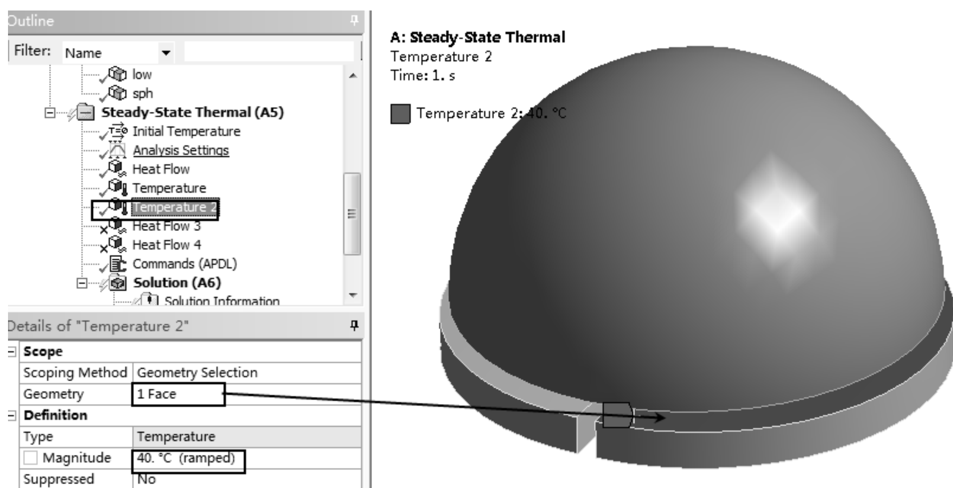


图 8-18　设置温度参数（2）

Step4：右键单击 Steady-State Thermal（A5）选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Commands 选项，如图 8-19 所示，此时在 Steady-State Thermal（A5）下面出现了 Commands 选项。

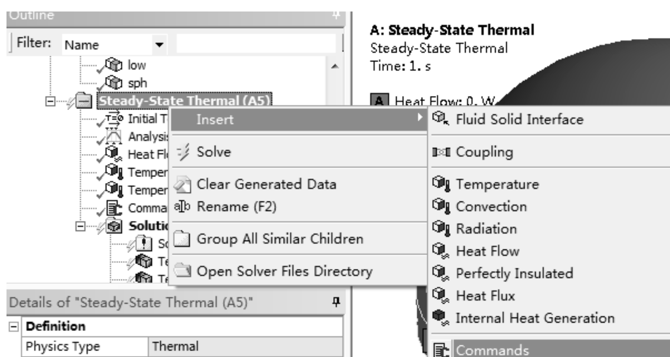


图 8-19 插入命令

Step5：选择 Commands 选项，此时将弹出 APDL 的命令输入窗口，在命令窗口中输入以下命令行，输入完成后如图 8-20 所示。

```
sf,High,rdsf,1,1
sf,low,rdsf,1,1
sf,sph,rdsf,1,1
spctemp,1,100
stef,5.67e-8
radopt,0.9,1.E-5,0,1000,0.1,0.9
toff,273
```

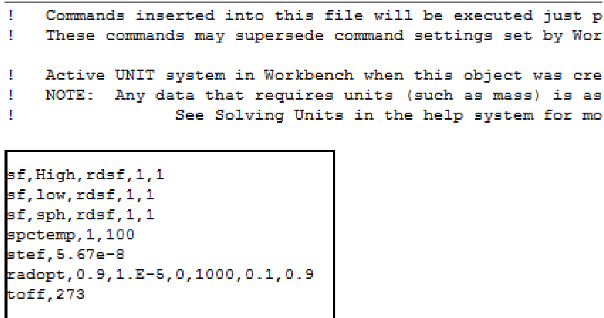


图 8-20 命令

注意：在输入 APDL 命令之前，要确保本次分析采用的是国际单位制，如果不是，需要读者进行进制转化，以免造成错误结果。

下面对在 Workbench 平台中的 Mechanical 热分析中插入的 APDL 命令行进行说明：

（1）sf 命令行：在 Workbench 中同样使用 ANSYS Classic 中的 sf 命令来施加表面边界条件，sf 命令的一般形式如下所示：

Sf，nlist，label，value，value2

在上述命令行中，nlist 是节点列表，也可以是命名选择，如本例中的 High、low 和 sph；Rdsf 是 ANSYS 中的辐射标签，即辐射中的关键字；Value 是表面发射率；Value2 是封闭体数量。

（2）spctemp 命令行：因为所计算的空间不是完全封闭的计算空间（系统），所以必须定

义空间温度，spctemp 命令的一般形式如下所示：

Spctemp，number，Temperature

在上述命令行中：Spctemp 是 ANSYS 定义空间温度的关键字；Number 是非封闭空间的数量；Temperature 是非封闭空间的温度。

（3）stef 命令行：stef 是 ANSYS 中的斯蒂芬玻尔兹曼常数，使用国际单位制时，stef=5.67×10^{-8}。

Stef 命令行的一般形式如下：

Stef，5.67e−8

（4）toff 命令行：由前面的热辐射理论可知，辐射计算是在绝对温度下进行的，所以在热辐射分析中必须定义绝对温度与摄氏度之间的关系，即 $K = 273 + ℃$，其中的 273 就是 toff，value 命令行中的 value 值。

（5）radopt 命令行：这个命令是 ANSYS 用来控制辐射求解器的。在热辐射计算中，这个命令很重要，其一般形式如下：

radopt，FLUXRELX，FLUXTOL，SOLVER，MAXITER，TOLER，OVERRLEX

其中 FLUXRELX 为松弛因子；FLUXTOL 为辐射热通量收敛容差，默认为 0.001；对于 SOLVER 为选择用于计算的辐射求解器，其值为 0 时代表 Gauss-Seidel 求解器，为 1 时代表直接求解器（对于大问题将耗费很多时间）；对于 MAXITER 指使用 Gauss-Seidel 求解器时的最大迭代次数，默认为 1000；对于 TOLER 指使用 Gauss-Seidel 求解器时的收敛容差，默认为 0.1；对于 OVERRLEX 指使用 Gauss-Seidel 求解器时的松弛因子，默认为 0.1；

8.2.7 求解及后处理

Step1：确认输入参数都正确后单击工具栏中的 Solve（求解）按钮，开始执行此次稳态热分析的求解。

Step2：结果后处理。选择 Thermal（热分析）选项，然后分别选择 Temperature（温度）以及 Total Heat Flux（全部的热流量），如图 8−21 所示。然后选择计算后处理结果，如图 8−22 所示为几何体的温度分布云图，从图中可以看出空心半球体的温度由左侧向右侧呈现出逐渐降低的分布趋势，其主要原因是左侧的底盘温度较高而右侧底盘温度较低。

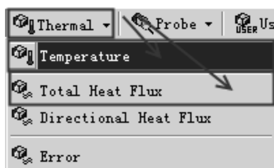


图 8−21　选择后处理项目

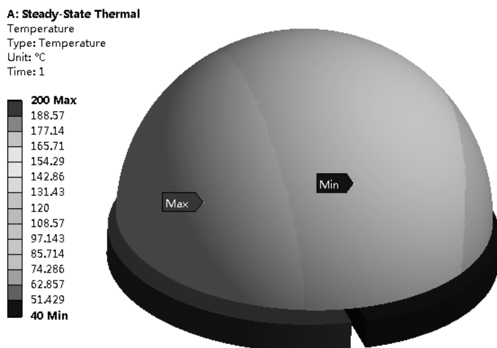


图 8−22　所有实体温度云图

Step3：图 8-23 显示了整体几何的热流云图，从云图中可以看出空心半球体在两个底盘中间位置处的热流密度比较大，而底盘最左侧及最右侧的热流密度较小。

Step4：图 8-24 显示了空心半球体的温度分布，从图中可以看出靠近 200℃底盘位置的温度较高，而靠近 40℃底盘位置的温度较低。



图 8-23　热流云图

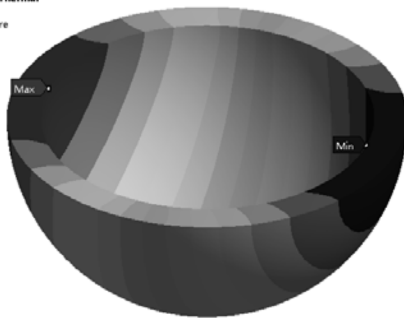


图 8-24　温度云图

8.2.8 保存并退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

8.3 本章小结

本章节通过典型实例介绍了热辐射的操作过程，在分析过程中考虑了与周围空气的对流换热边界，在后处理工程中得到了温度分布云图及热流密度分布云图。通过本章节的学习，读者应该对 ANSYS Workbench 平台的简单热力学分析过程有了详细了解。

高级应用篇

第 9 章 相 变 分 析

相变分析是沸腾与蒸发领域中的一个应用，其主要分析内容是通过对被分析结构的基本相的变化来确定相变时间、相变温度分布等。本章节通过简单案例对铸造过程中的相变过程进行分析。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
相变分析的基本概念	√	√		
相变分析操作方法		√	√	√
相变分析的应用领域		√	√	√

9.1 相变分析简介

9.1.1 相与相变

（1）相：物质的一种确定原子形态，均匀同性称为相。自然界中有三种基本的相，即气体、液体及固体。

（2）相变：系统能量的变化可能导致物质的原子结构发生的改变，称为相变。通常的相变包括凝固、融化和汽化三种类型。

9.1.2 潜热与焓

（1）潜热：当物质发生相变时，温度保持不变，在物质相变过程中所需要的热量称为潜热。例如，冰融化为水的过程中温度保持不变，但是需要吸收热量，此热量即为潜热。

（2）焓：在工程热力学中，焓可由以下式子确定：

$$H = U + PV$$

式中，H 为焓；U 为热力学能；P 为压力；V 为体积。

焓在工程热力学中是一个重要的物理量，可以从以下几个方面理解它的物理意义和性质：

1）焓是状态函数，具有能量的量纲。

2）焓的量值与物质的量有关，具有可加性。

3）和热力学能一样，无法确定焓的绝对值，但是可以确定两个不同状态下的焓值的变

化量 ΔH 。

4）对于定量的某种物质而言，若不考虑其他因素，则吸热时焓值增加，放热时焓值减小。

5）焓的变化量 ΔH 有正负之分，当某一过程逆向进行时，其值 ΔH 要改变符号，即 $\Delta H_{正} = -\Delta H_{逆}$ 。

相变分析必须考虑材料的潜热，即在相变过程中吸收或放出的热量，在 ANSYS Workbench 平台中通过定义材料的焓特性来计入潜热。焓值的单位和能量的单位一样，一般用 kJ 表示。比焓的单位为能量/质量，一般为 kJ/kg 。在 ANSYS Workbench 平台中，焓材料特性为比焓，它可以用密度、比热容通过积分算出。计算公式为：

$$H = \int \rho c(T)\mathrm{d}T$$

式中，H 为焓值，ρ 为材料的密度，$c(T)$ 为随温度变化的比热容。

9.1.3 在 ANSYS Worbench 平台中相变分析的基本思路

相变分析必须考虑材料的潜热，将材料的潜热定义到材料的焓中，其中焓的数值随温度变化。在相变过程中，焓的变化相对于温度而言十分迅速。对于纯材料，液体温度与固体温度的差值应该为 0，在计算时，通常取很小的温度差。由此可见热分析是非线性的。在 ANSYS Workbench 平台中将焓作为材料属性的定义，通常用温度来区分相。通过相变分析可以获得物质在各个时刻的温度分布，以及典型位置处节点随时间变化的曲线。通过温度云图，可以得到完全相变所需的时间，并对物质任何时间间隔的相变情况进行预测。

（1）相变分析的控制方程：在相变分析过程中，控制方程为：

$$[\boldsymbol{C}][\dot{\boldsymbol{T}}_t]+[\boldsymbol{K}][\boldsymbol{T}_t]=[\boldsymbol{Q}_f]$$

其中：

$$[\boldsymbol{C}]=\int \rho \mathrm{c}[\boldsymbol{N}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{N}]\mathrm{d}V$$

式中，ρ为物质的密度；c 为物质的比热。

（2）计算焓值的方法：焓曲线根据温度可以分成 3 个区域：在固体温度(T_s)以下，物质为纯固体；在固体温度(T_s)与液体温度(T_l)之间，物质处于相变区；在液体温度(T_l)以上，物质为纯液体，如图 9–1 所示。

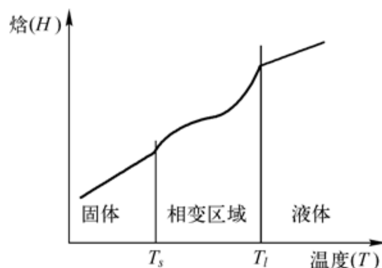


图 9–1 焓值计算示意图

焓值计算方程为：

1）在固体温度以下$(T<T_s)$时：

$$H=\rho c_s(T-T_l)$$

式中，c_s为固体比热容。

2）在固体温度$(T=T_s)$时：

$$H_s=\rho c_s(T_s-T_l)$$

3）在固体温度$(T_s<T<T_l)$时：

$$H=H_s+\rho c^*(T-T_s)$$

式中，$c^*=c_{avg}+\dfrac{L}{(T_l-T_s)}$，$c_{avg}=\dfrac{c_s+c_l}{2}$，其中$c_l$为液体比热容，$L$为融化热。

4）在液体温度$(T = T_l)$时：

$$H = H_s + \rho c^*(T_l - T_s)$$

5）在温度高于液体温度$(T > T_l)$时：

$$H = H_l + \rho c_l(T - T_l)$$

9.2 相变分析案例——飞轮铸造模拟

本节以 ANSYS 官方案例中的飞轮铸造分析为对象，详细讲解飞轮铸造过程中进行的相变分析的操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中铸造仿真分析的建模方法及求解过程。

模型文件	网盘\Chapter9\char09-1\wheel.agdb
结果文件	网盘\Chapter9\char09-1\zhuzaofenxi.wbpj

9.2.1 问题描述

对于一个图 9-2 所示的铝制飞轮铸造过程进行相变分析。飞轮是将溶解的铝液体注入到砂模中制造而成的，试分析飞轮的凝固过程。

参数及假设：部件在圆柱形砂模（高 20cm，半径 25cm）的中心；铝在 800℃时注入砂模；砂模初始温度为 25℃；模型顶面和侧面与环境通过自由对流交换热量；假设砂模和铝均为轴对称结构；假设砂的热材料属性为常数，铝为随时间变化，比热和密度将用来计算铝的热焓。

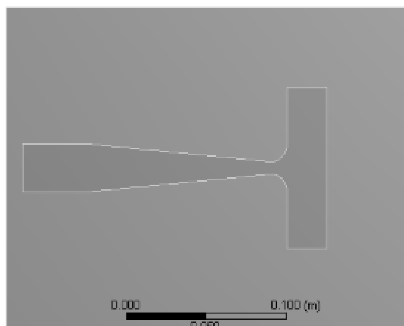


图 9-2 模型

9.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：在 Workbench 平台中依次选择菜单 Tools→Options，如图 9-3 所示。

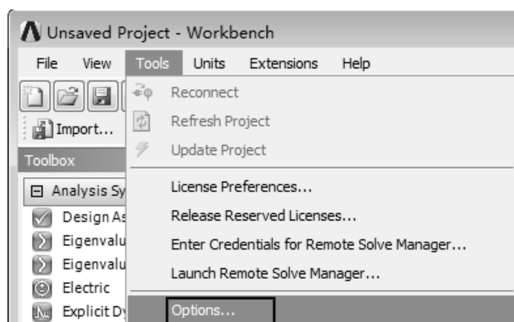


图 9-3 菜单

Step3：在图 9-4 所示的对话框中选择左侧的 Geometry Import，从 Analysis Type 栏中选择分析类型为 2D，其余默认即可，单击 OK 按钮。

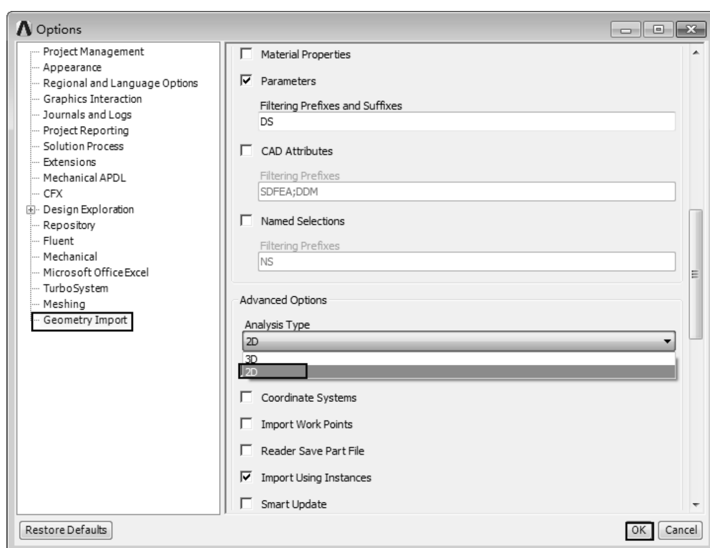


图 9-4 分析类型

Step4：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Transient Thermal（瞬态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 9-5 所示。

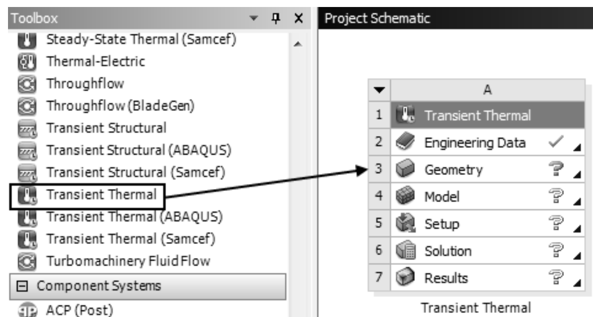


图 9-5 创建分析项目 A

9.2.3 导入几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 9-6 所示。

Step2：在弹出的图 9-7 所示的对话框中选择几何文件路径，并选择名称为 wheel.agdb 格式的几何文件并单击“打开”按钮。

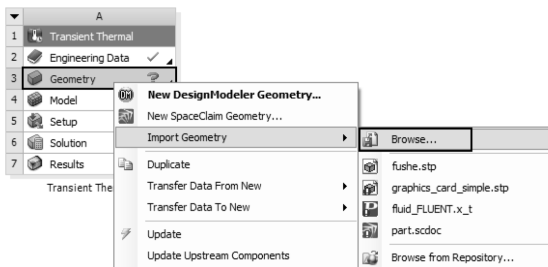


图 9-6　导入几何体

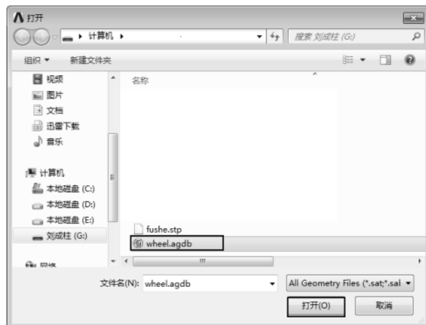


图 9-7　“打开”对话框

Step3：此时导入到 DesignModeler 平台中的几何模型如图 9-8 所示。从图中左侧可以看出，所有的建模命令都出现了闪电图标，即表示需要对当前几何进行数据更新，在工具栏中单击 Generate 按钮，此时经过一段时间的计算，将几何参数中的所有数据更新到最新状态。

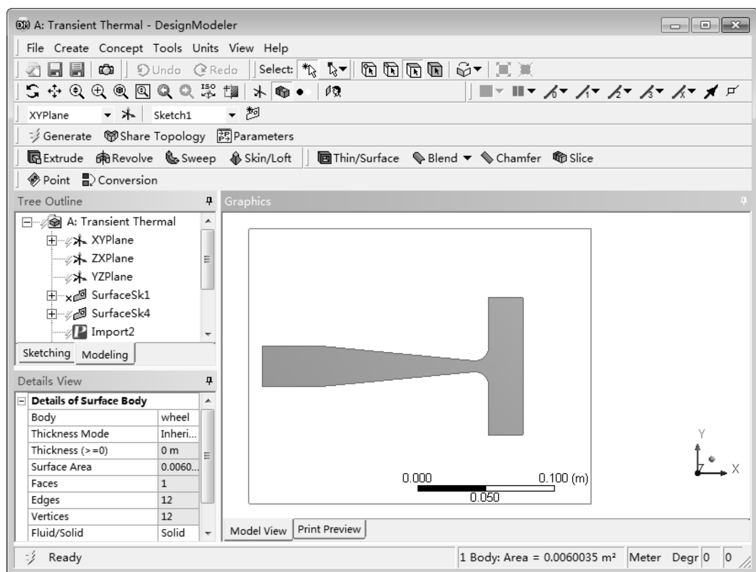


图 9-8　模型

Step4：单击工具栏中的 （保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 xiangbianfenxi.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的 （关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

9.2.4 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面。

Step2：单击工具栏中的 Engineering Data Sources 选项，此时进入图 9–9 所示的材料选择窗口，在出现的 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中输入材料名称为 shamo，在 Properties of Outline Row 4：shamo 窗口分别添加 Density、Isotropic Thermal Conductivity 及 Specific Heat 三个属性，并分别将三个属性中的数值依次输入为 1520、0.346 及 816。

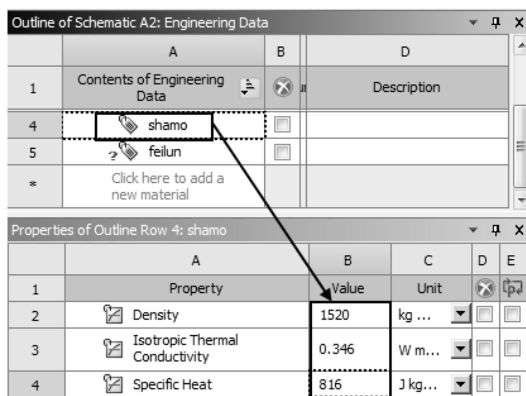


图 9–9 材料选择窗口

Step3：在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏中输入材料名称 feilun，在 Properties of Outline Row 5：feilun 窗口添加 Isotropic Thermal Conductivity 属性，并将属性中的数值输入成随温度变化（见表 9–1），如图 9–10 所示，在工具栏中单击 A2:Engineering Data × 中的 X 关闭材料设置窗口。

表 9–1 输入的温度数值

温度	0	100	200	300	400	530	800
导热系数	206	206	215	228	249	268	290

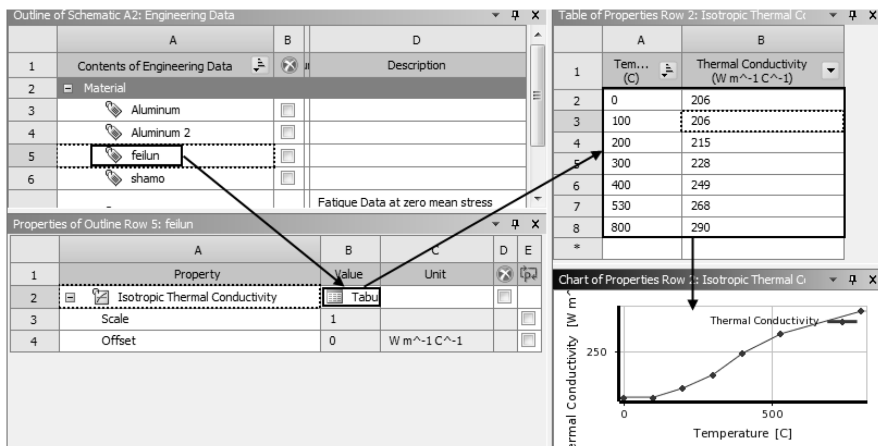


图 9–10 添加 Isotropic Thermal Conductivity 属性

Step4：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4：Model 项，进入图 9-11 所示的 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

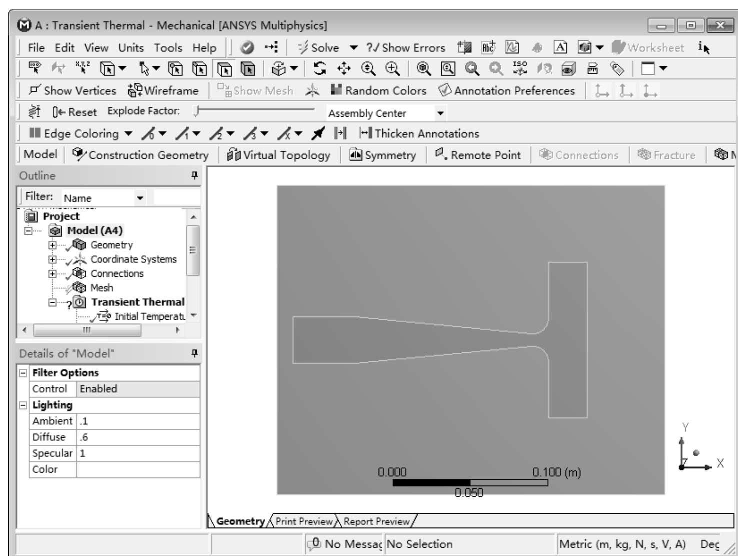


图 9-11　Mechanical 界面

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中的 Geometry 选项，此时即可在 Details of“Geometry”（参数列表）中做图 9-12 所示的设置：在 Definition→2D Behavior 栏中选择 Axisymmetric 选项，此选项表示将当前二维几何模型设置为二维轴对称样式。

Step6：返回到 Outline，并选择 Model（A4）→Geometry→sand 选项，在下面出现的 Details of “sand”详细设置面板中，选择单击参数列表 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 shamo，选择即可将其添加到模型中去，如图 9-13 所示。

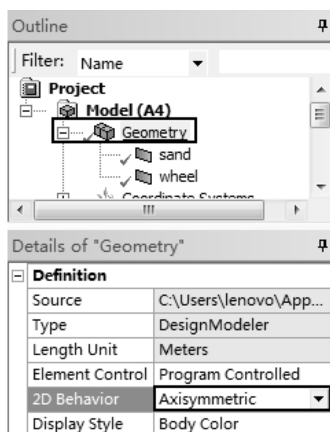


图 9-12　轴对称设置

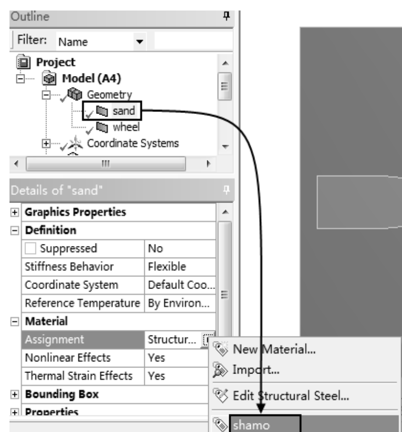


图 9-13　材料

Step7：选择 Model（A4）→Geometry→wheel 选项，在下面出现的图 9-14 所示的 Details of “wheel”详细设置面板中，选择单击参数列表 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 feilun，选择即可将其添加到模型中去。

Step8：右键选择 Model（A4）→Geometry→wheel 选项，此时在弹出的图 9-15 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Commands 命令。

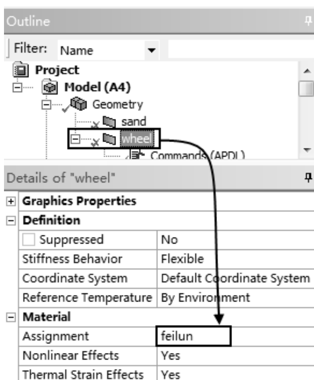


图 9-14 材料



图 9-15 插入命令

Step9：选择 wheel 下面的 Commands（APDL）选项，此时右侧的绘图区域将变成图 9-16 所示的命令窗口，在这里可以进行编程。

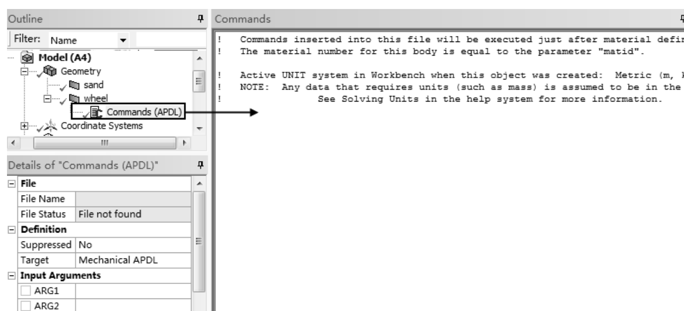


图 9-16 命令窗口

Step10：在右侧命令行窗口中输入如下命令，如图 9-17 所示。

```
MPTEMP,1,0,695,700,1000
MPDATA,ENTH,MATID,0.0,1.6857E+9,2.7614E+9,3.6226E+9
```

注：这里通过插入命令行对材料在不同温度下的焓值进行输入。

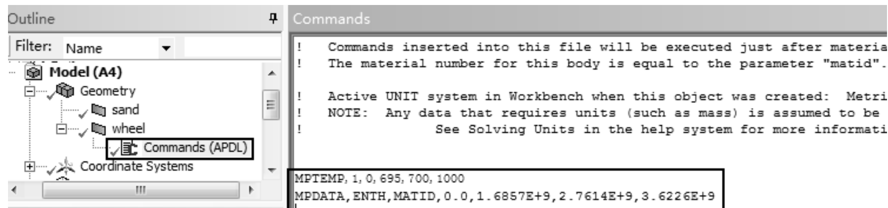


图 9-17 命令行

Step11：在 Outline 中选择 Transient Thermal（A5），并选择 Environment 工具栏中的 Convection 选项，如图 9-18 所示，创建 Convection（热对流）。



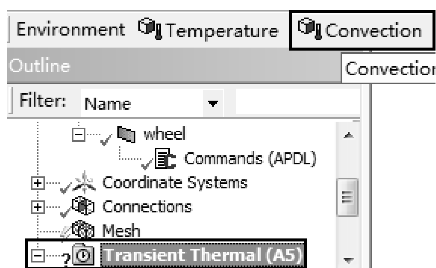


图 9-18　对流

Step12：在 Outline 中选择 Convection 选项，在下面出现的图 9-19 所示的 Details of "Convection"详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中确保几何体右侧的边线被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 7.5；在 Ambient Temperature 栏中输入温度为 30，其余保持默认即可。

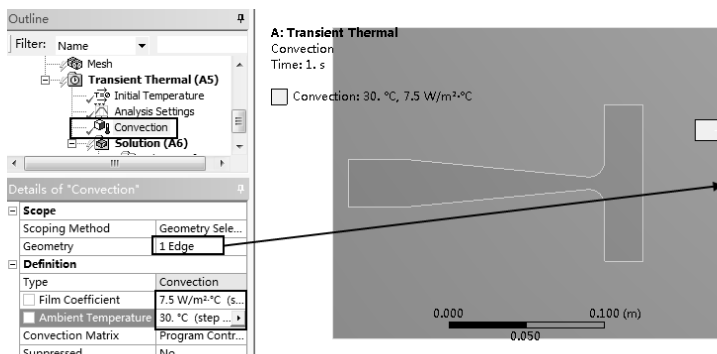


图 9-19　对流参数 1

Step13：在 Outline 中选择 Transient Thermal（A5），再次选择 Environment 工具栏中的 Convection 选项，创建第二个 Convection（热对流）选项。

Step14：在 Outline 中，选择 Convection2 选项，在下面出现的图 9-20 所示的 Details of "Convection2"详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中确保几何体上下边线被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 5.75；在 Ambient Temperature 栏中输入温度为 30，其余保持默认即可。

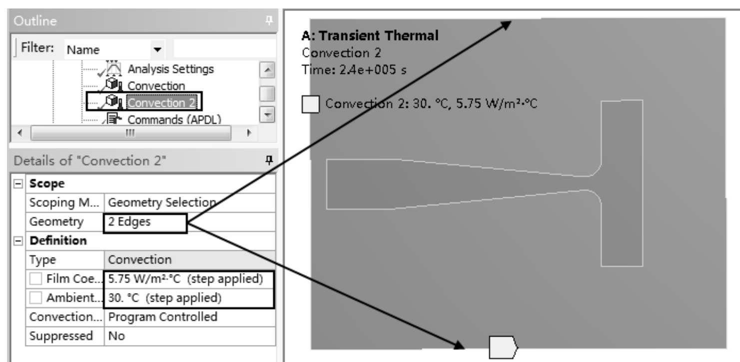


图 9-20　对流参数 2

Step15：单击 Outline 中的 Transient Thermal（A5）下面的 Analysis Settings，在下面出

现的图 9−21 所示的 Details of “Analysis Settings”详细设置面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 2.4e+005s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 On；在 Define By 栏中选择 Time；在 Initial Time Step 栏中输入 1.e−002s；Mimimum Time Step 栏中输入 1.e−002s；Maximum Time Step 栏中输入 20s；在 Solver Type 栏中选择 Iterative 选项；在 Line Search 栏中选择 On 选项；在 Nonlinear Formulation 栏中选择 Full 选项，其余保持默认即可。

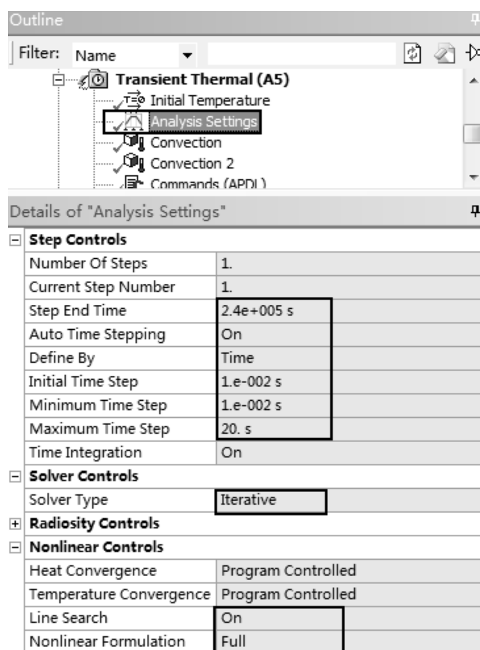


图 9−21　设置

Step16：在 Outline 窗口中右键选择 Model（A4）→sand 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Create Named Selection 选项，此时弹出图 9−22 所示的 Selection Name 对话框，在其中输入 thesand，并单击 OK 按钮完成命名。

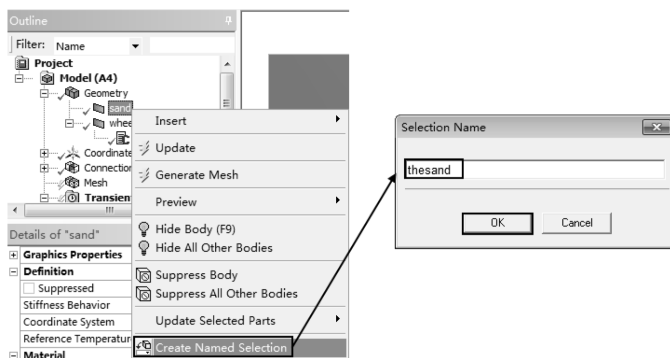


图 9−22　命名 1

Step17：在 Outline 窗口中右键选择 Model（A4）→wheel 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Create Named Selection 选项，此时弹出图 9−23 所示的 Selection Name 对话框，在其中输入 thewheel，并单击 OK 按钮完成命名。

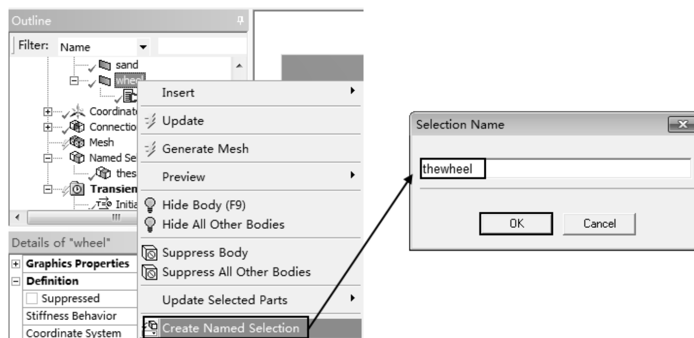


图 9-23　命名 2

Step18：在 Outline 窗口中右键选择 Named Selections 选项，此时绘图窗口中，图 9-24 所示的几何体被选中。

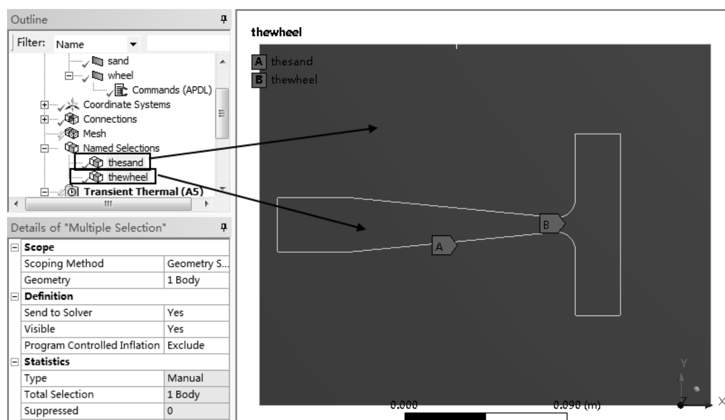


图 9-24　选择几何体

Step19：右键选择 Transient Thermal（A5），弹出图 9-25 所示的快捷菜单，从中依次选择 Insert→Commands 选项。

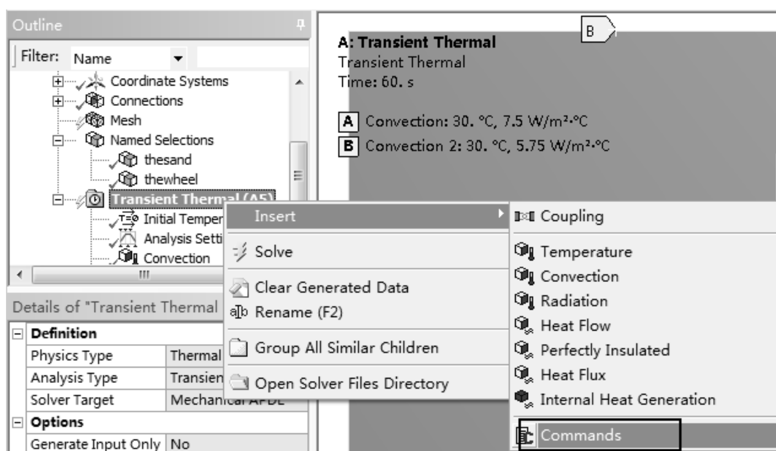


图 9-25　插入命令

Step20：选择 wheel 下面的 Commands（APDL）选项，在右侧命令行窗口中输入如下命令，如图 9-26 所示。

```
cmsel,s,thesand
nsle
ic,all,temp,25
cmsel,s,thewheel
nsle
ic,all,temp,800
Alls
```

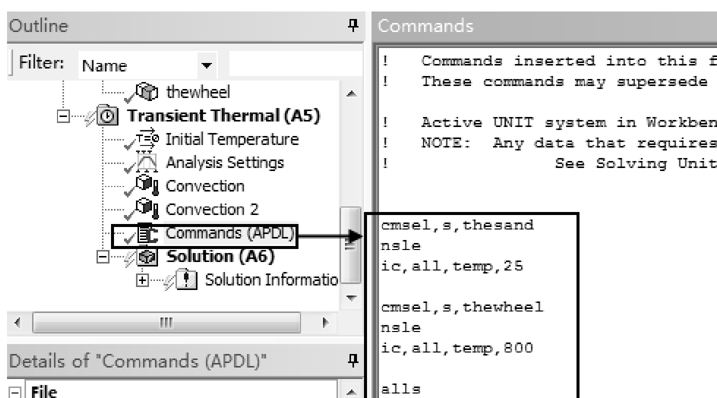


图 9-26 输入命令行

Step21：在 Outline 窗口中依次选择 Connections→Contacts→Contact Region 选项，在下面出现的图 9-27 所示的 Details of “Contact Region”详细设置面板，在 Thermal Conductance 栏中输入 10000，单位默认。

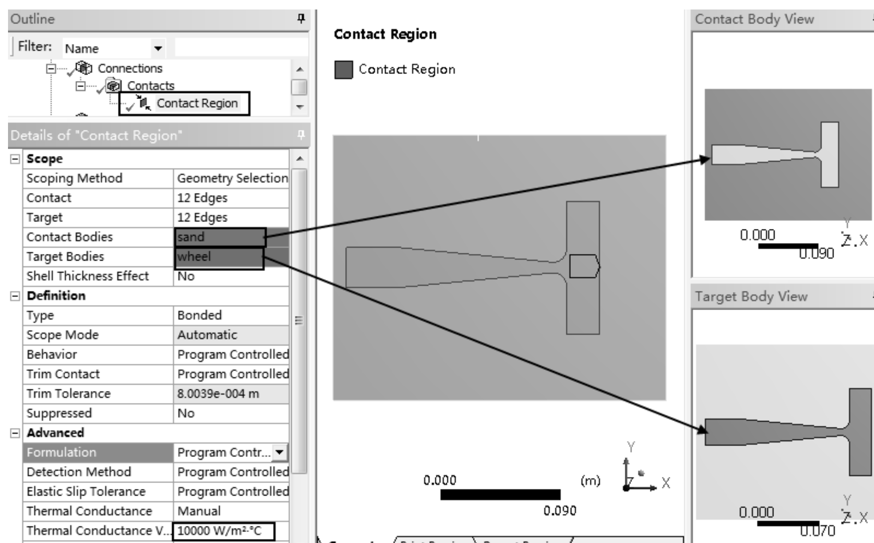


图 9-27 设置参数

Step22：返回到 Transient Thermal（A5）→Commands（APDL）选项中，在后面添加以下两行命令，如图 9-28 所示。

```
neqit,100
lnsrch,on
```

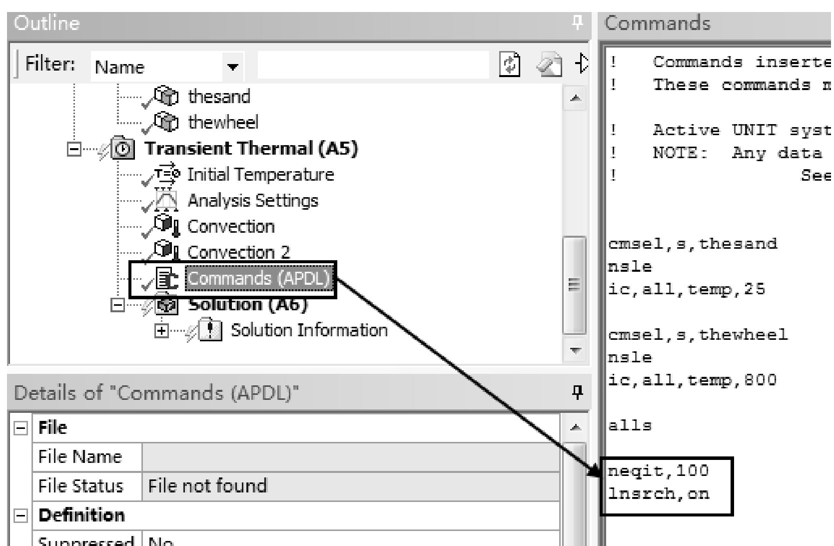


图 9-28　添加命令行

Step23：在 Outline 栏中，右键选择 Mesh 选项，弹出图 9-29 所示的快捷菜单，从中依次选择 Insert→Sizing 选项，进行网格大小设置。

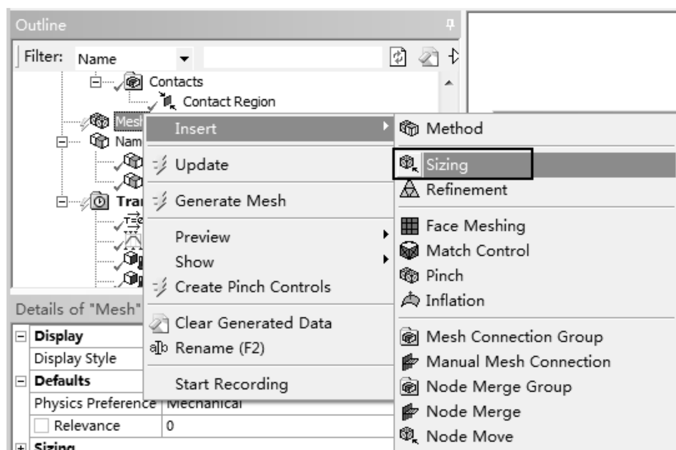


图 9-29　快捷菜单

Step24：在 Outline 栏中，单击 Mesh 下面的 Face Sizing 选项，在下面出现的 Detail of "Face Sizing"-Sizing 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中 sand 几何；在 Element Size 栏中设置网格大小为 2.e-003m，其余保持默认即可，如图 9-30 所示。

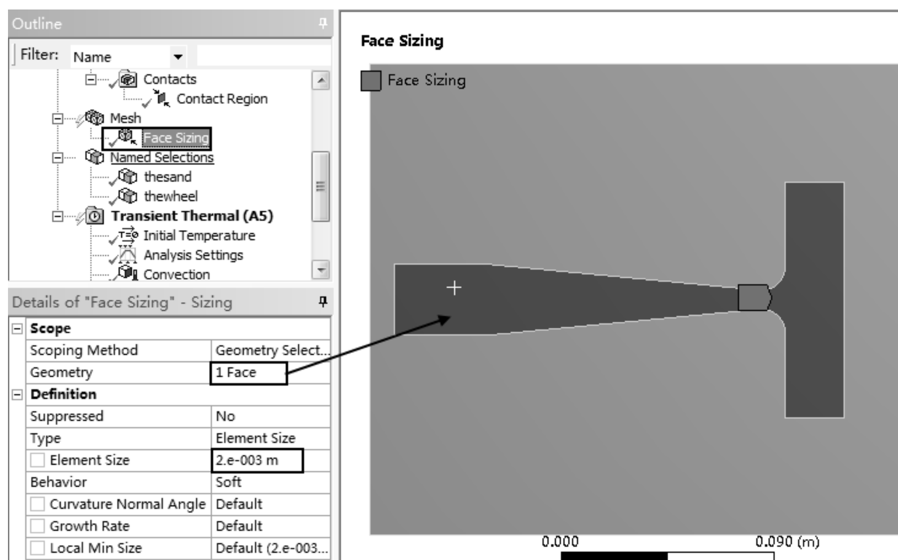


图 9-30 网格设置

Step25：选择 Mesh 选项，弹出图 9-31 所示的 Details of “Mesh”详细设置面板，在 Physics Preference 栏中选择 CFD 选项；在 Relevance 栏中输入 50，其余默认即可。

Step26：右键选择 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 General Mesh，经过一段时间的网格划分，划分完的网格如图 9-32 所示。

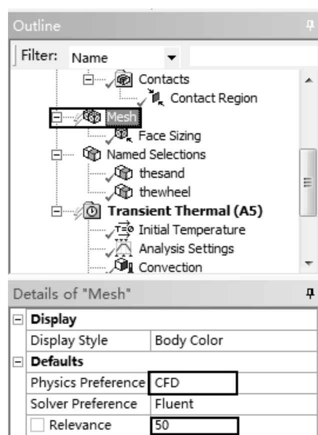


图 9-31 网格设置

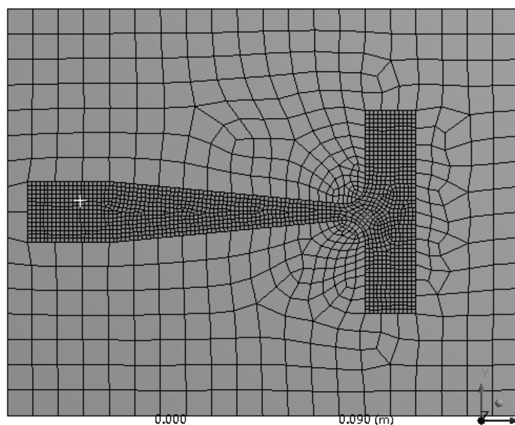


图 9-32 划分完成的网格

Step27：选择 Outline 窗口中的 Coordinate System 选项，然后单击工具栏中的按钮，创建用户坐标系，在下面出现的图 9-33 所示的 Details of “Coordinate System”详细设置面板中作如下设置：在 Define By 栏中选择 Global Coordinates 选项；在 Origin X 栏中输入 1.5e-002m；在 Origin Y 栏中输入 0m，其余默认即可，此时创建了第一个用户坐标系。

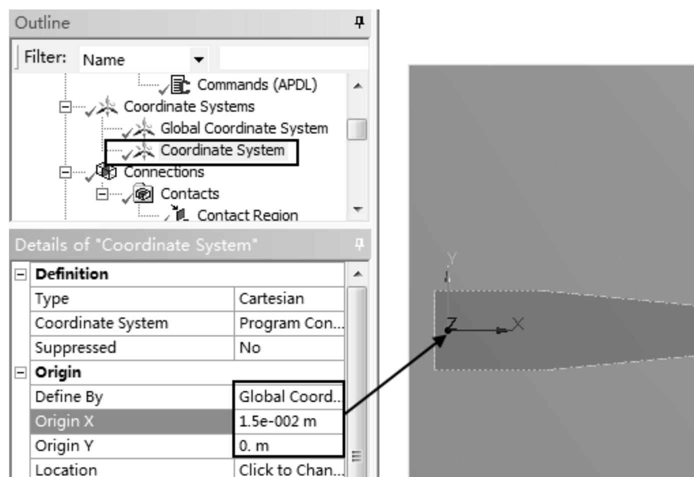


图 9-33 创建坐标系

Step28：选择 Outline 窗口中的 Coordinate System 2 选项，然后单击工具栏中的按钮，创建用户坐标系，在下面出现的图 9-34 所示的 Details of “Coordinate System 2”详细设置面板中作如下设置：在 Define By 栏中选择 Global Coordinates 选项；在 Origin X 栏中输入 0.105m；在 Origin Y 栏中输入 0m，其余默认即可，此时创建了第二个用户坐标系。

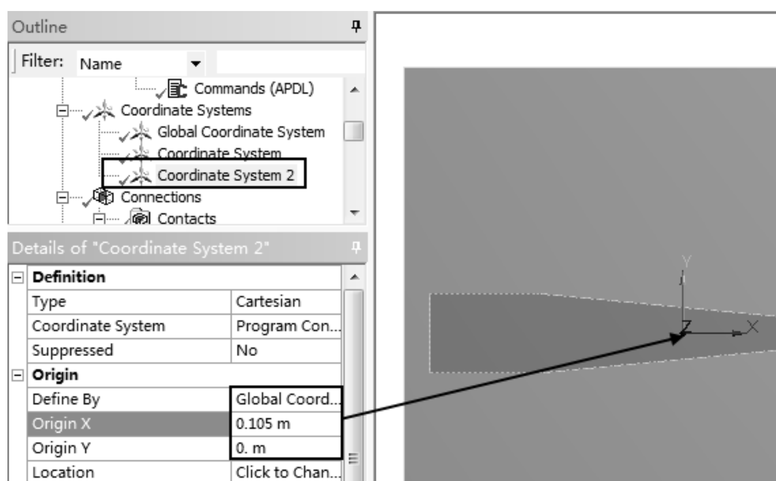


图 9-34 创建第二个坐标系

Step29：选择 Outline 窗口中的 Coordinate System 3 选项，然后单击工具栏中的按钮，创建用户坐标系，在下面出现的图 9-35 所示的 Details of “Coordinate System 3”详细设置面板中，在 Define By 栏中选择 Global Coordinates 选项；在 Origin X 栏中输入 0.195m；在 Origin Y 栏中输入 0m，其余默认即可，此时创建了第三个用户坐标系。

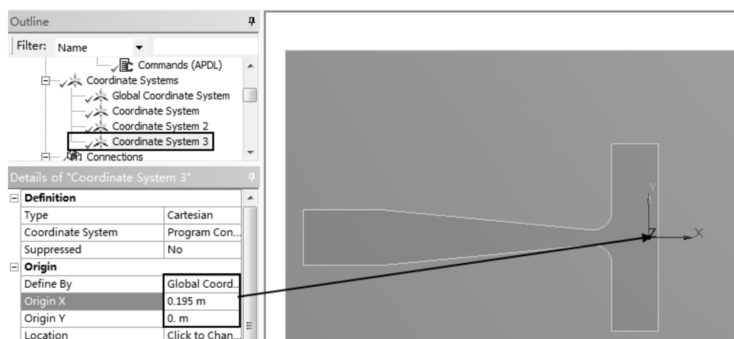


图 9-35 创建第三个坐标系

Step30：选择 Outline 窗口中的 Coordinate Systems 选项，将出现三个坐标系，如图 9-36 所示。

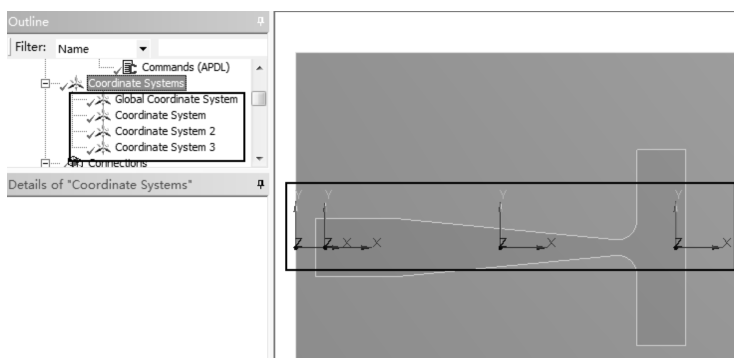


图 9-36 三个用户定义坐标系

Step31：在 Outline 窗口中，右键单击 Solution（A6）选项，在弹出的图 9-37 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Probe→Temperature 选项，创建温度探测工具。

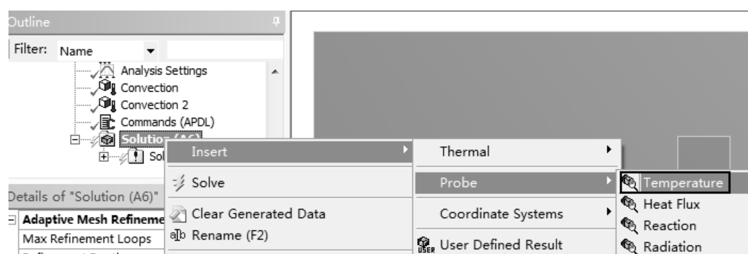


图 9-37 探测工具

Step32：此时在 Solution（A6）下面出现了 Temperature Probe 选项，单击该选项，下面出现图 9-38 所示的 Details of “Temperature Probe”详细设置面板，在其 Location 栏中选择用户自定义的 Coordinate System 选项。

Step33：重复上一步操作，插入第二个温度探测工具，程序自动命名为 Temperature Probe 2，单击该选项，下面出现图 9-39 所示的 Details of “Temperature Probe 2”详细设置



面板，在其 Location 栏中选择用户自定义的 Coordinate System 2 选项。

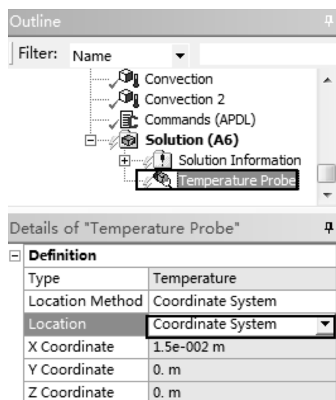


图 9-38 设置 Temperature Probe

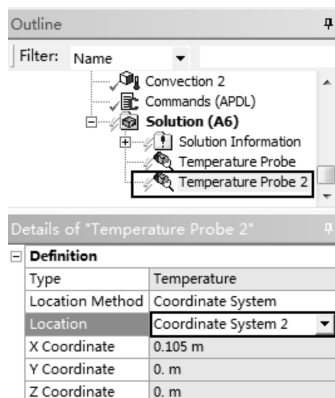


图 9-39 设置 Temperature Probe 2

Step34：重复上一步操作，插入第三个温度探测工具，程序自动命名为 Temperature Probe 3，单击该选项，下面出现图 9-40 所示的 Details of “Temperature Probe 3”详细设置面板，在其 Location 栏中选择用户自定义的 Coordinate System 3 选项。

Step35：在工具栏中单击按钮，下面出现图 9-41 所示的 Details of “Chart”详细设置面板，在 Outline Selection 栏中确保上面的三个温度探测选项被选中，此时 Outline Selection 后面的栏中显示出 3Objects，同时右侧显示出不同时刻三个探测工具探测到的温度曲线。

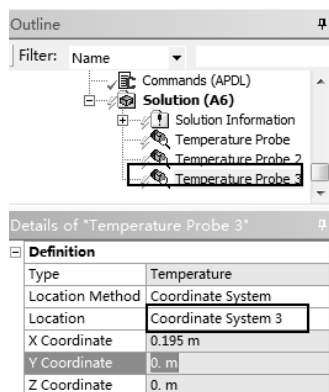


图 9-40 设置 Temperature Probe 3

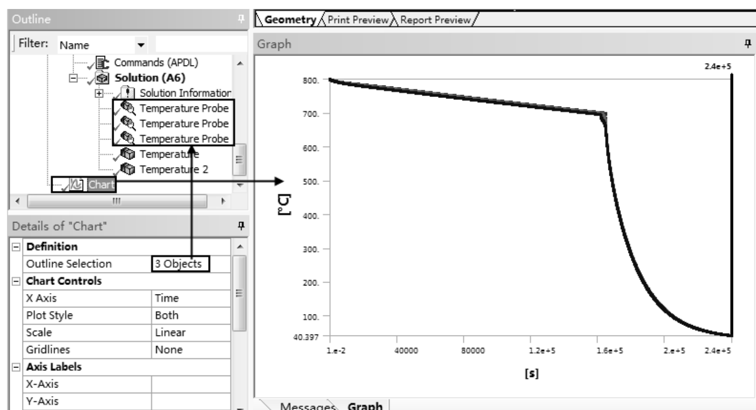


图 9-41 温度曲线

Step36：右键选择 Solution（A6），在弹出的图 9-42 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Thermal→Temperature。

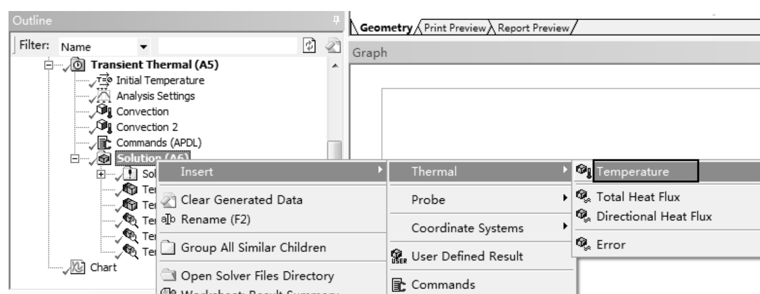


图 9-42　快捷菜单

Step37：在 Solution（A6）下面选择 Temperature 菜单，此时窗口右侧出现整个几何随温度变化的热点温度分布云图与最低温度分布云图，如图 9-43 所示。

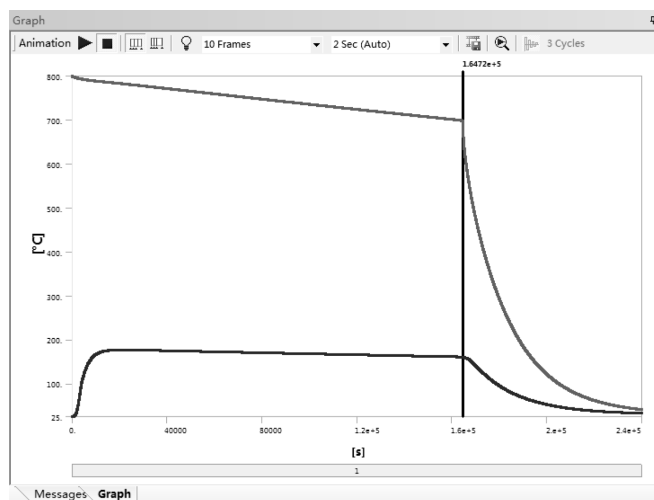


图 9-43　曲线

Step38：在绘图区域显示出图 9-44 所示的最后时刻的温度分布云图。

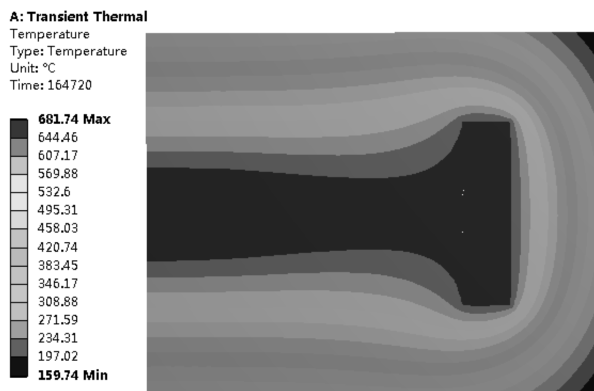


图 9-44　最后时刻的温度分布

9.2.5 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回，到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

9.3 本章小结

本章节通过典型实例介绍了相变分析的操作过程，在分析过程中考虑了与周围空气的对流换热边界，在后处理过程中得到了温度分布云图。通过本章节的学习，读者应该对 ANSYS Workbench 平台的相变分析过程有详细的了解。



第10章 优 化 分 析

结构优化是指从众多方案中选择最佳方案的技术。一般而言，设计主要有两种形式，即功能设计和优化设计。功能设计强调的是该设计能达到预定的设计要求，但仍能在某些方面进行改进。优化设计是一种寻找确定最优化方案的技术。

学习目标 / 知识点	了 解	理 解	应 用	实 践
优化分析的基本概念	√	√		
优化分析操作方法		√	√	√
优化分析的应用领域		√	√	√

10.1 优化分析简介

所谓“优化”是指“最大化”或者“最小化”，“优化设计”指的是一种方案可以满足所有的设计要求，而且需要的支出最小。

10.1.1 优化设计概述

优化设计有两种分析方法：解析法，通过求解微分与极值，进而求出最小值；数值法，借助于计算机和有限元，通过反复迭代逼近，求解出最小值。由于解析法需要列方程并求解微分方程，对于复杂的问题而言比较困难，所以解析法常用于理论研究，很少在工程上使用。

随着计算机技术的发展，结构优化算法取得了更大的发展，根据设计变量的类型不同，已由较低层次的尺寸优化，发展到较高层次的结构形状优化，现如今已达到了更高层次——拓扑优化。优化算法也由简单的准则法发展到数学规划法，再到遗传算法等。

传统的结构优化设计是由设计者提供几个不同的设计方案，比较后挑选出最优化的方案。这种方法往往建立在设计者经验的基础上，再加上资源时间的限制，提供的可选方案数量有限，往往不一定是最优方案。

如果想获得最佳方案，就要提供更多的设计方案进行比较，这就需要大量的资源，单靠人力往往难以做到，只能靠计算机来完成。到目前为止，能够做结构优化的软件并不多，ANSYS 软件作为通用的有限元分析工具，除了拥有强大的前后处理器外，还有很强大的优化设计功能，既可以做结构尺寸优化亦能做拓扑优化，其本身提供的算法能够满足工程需要。

10.1.2 Workbench 结构优化分析简介

ANSYS Workbench Environment（AWE）是 ANSYS 公司开发的新一代前后处理环境，

并且定为一个 CAE 协同平台，该环境实现了与 CAD 软件及设计流程的高度集成性，并且新版本增加了很多 ANSYS 软件模块，并实现了很多常用功能，使产品开发中能快速应用 CAE 技术进行分析，从而缩短产品设计周期、提高产品附加价值。现今，对于制造商来说，产品质量关乎着声誉、产品利润和发展，所以优化设计在产品开发中越来越受重视，并且方法手段也越来越多。

从易用性和高效性来说，AWE 下的 DesignXplorer 模块为优化设计提供了一个几近完美的方案，CAD 模型需改进的设计变量可以传递到 AWE 环境中，并且在 DesignXplorer/VT 下设定好约束条件及设计目标后，可以高度自动化地实现优化设计并返回相关图表。本章将结合实际应用，介绍如何使用 Creo 和 ANSYS 软件在 AWE 环境下实现快速优化设计过程。

概括地说，优化是指在保证产品达到某些性能目标并满足一定约束条件的前提下，通过改变某些允许改变的设计变量，使产品的指标或性能达到最期望的目标。

例如，在保证结构刚强度满足要求的前提下，通过改变某些设计变量，使结构的重量最轻最合理，这不但使得结构耗材得到了节省，也为运输安装提供了方便，降低了运输成本。再如，改变电器设备各发热部件的安装位置，使设备箱体内部温度峰值降到最低，就是一个典型的自然对流散热问题的优化实例。

在实际设计与生产中，类似这样的实例不胜枚举。优化作为一种数学方法，通常利用对解析函数求极值的方法来达到寻求最优值的目的。基于数值分析技术的 CAE 方法，其计算所求得的结果只是一个数值，显然不可能针对我们的目标得到一个解析函数。然而，样条插值技术又使 CAE 中的优化成为可能，多个数值点可以利用插值技术形成一条连续的、可用函数表达的曲线或曲面，如此便回到了数学意义上的极值优化技术上来。

样条插值方法是种近似方法，通常不可能得到目标函数的准确曲面，但利用上次计算的结果再次插值得到一个新的曲面，相邻两次得到的曲面的距离会越来越近，当它们的距离小到一定程度时，就可以认为此时的曲面代表了目标曲面。那么，该曲面的最小值，便可以认为是目标最优值。以上就是 CAE 方法中的优化处理过程。一个典型的 CAD 与 CAE 联合优化过程通常需要经过以下步骤：

（1）参数化建模：利用 CAD 软件的参数化建模功能把将要参与优化的数据（设计变量）定义为模型参数，为以后软件修正模型提供可能。

（2）CAE 求解：对参数化 CAD 模型进行加载与求解。

（3）后处理：将约束条件和目标函数（优化目标）提取出来供优化处理器进行优化参数评价。

（4）优化参数评价：优化处理器将本次循环提供的优化参数（设计变量、约束条件、状态变量及目标函数）与上次循环提供的优化参数比较之后，确定该次循环目标函数是否达到了最小，或者说结构是否达到了最优。如果最优，完成迭代，退出优化循环圈；否则，进行下步。

（5）根据已完成的优化循环和当前优化变量的状态修正设计变量，重新投入循环。

10.1.3 Workbench 结构优化分析

ANSYS Workbench 平台有五种优化分析工具，即 Direct Optimization（Beta）（直接优化工具）、Goal Driven Optimization（多目标驱动优化分析工具）、Parameters Correlation（参数

相关性优化分析工具）、Response Surface（响应曲面优化分析工具）及 Six Sigma Analysis（六西格玛优化分析工具）。

- Direct Optimization（Beta）（直接优化工具）：设置优化目标，利用默认参数进行优化分析，从中得到期望的组合方案。
- Goal Driven Optimization（多目标驱动优化分析工具）：从给定的一组样本中得到最佳的设计点。
- Parameters Correlation（参数相关性优化分析工具）：可以得出某一输入参数对应响应曲面影响的大小。
- Response Surface（响应曲面优化分析工具）：通过图表来动态显示输入与输出参数之间的关系。
- Six Sigma Analysis（六西格玛优化分析工具）：基于 6 个标准误差理论来评估产品的可靠性概率，以及判断产品是否满足六西格玛准则。

10.2 优化分析案例——散热肋片优化

本节将详细介绍通过 ANSYS Workbench 平台进行散热片的肋片热优化分析的操作过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中热优化分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter10\char10-1\youhua.wbpj

10.2.1 问题描述

图 10-1 所示为带散热肋片的基座，基座的底面温度为 50℃，基座与肋片的材质均为铝，试通过优化分析的方式，对不同类型的肋片及肋片间距离进行调整，计算温度变化特性。

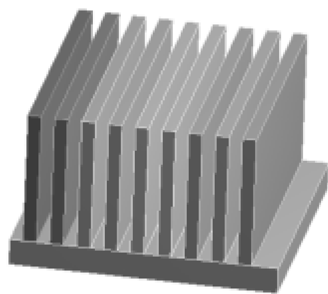


图 10-1 模型

10.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 10-2 所示。

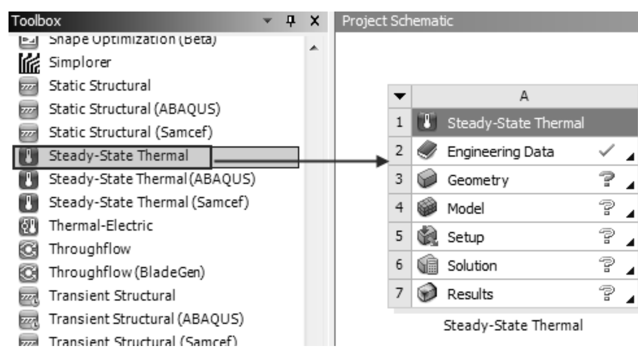


图 10-2　创建分析项目 A

10.2.3 创建几何体模型

Step1：在 A3 Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 10-3 所示。

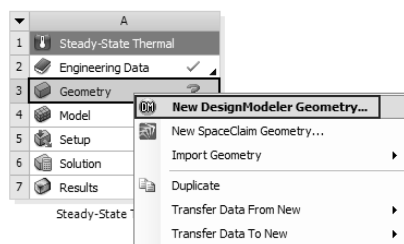


图 10-3　导入几何体

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。依次选择 Units 菜单中的 Millimeter 设置长度单位为 mm，在 DM 窗口中选择 Tree Outline→XYPlane 命令，再选择 Sketching 选项卡，选择 Draw→Rectangle，以坐标原点为矩形的正中心开始绘制一个矩形。

Step3：单击 Diementions 选项卡，然后选择 General，标注矩形的长和宽，如图 10-4 所示，设置 H2 为 100mm，H5 为 50mm，V3 为 100mm，V6 为 50mm。

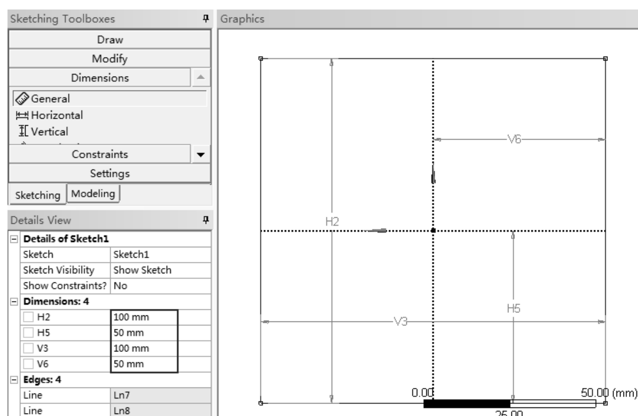


图 10-4　生成后的 DesignModeler 界面

Step4：切换到 Modeling 选项卡，选择工具栏中的 Extrude 拉伸命令，在“Details View”详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch1；在 Operation 栏中选择 Add Frozen；在 FD1,Depth（>0）栏中输入拉伸长度为 10mm，其余默认即可，如图 10–5 所示。创建的几何如图 10–6 所示。

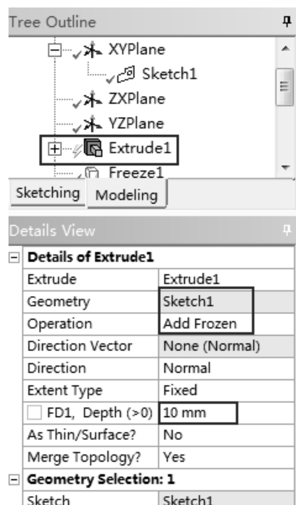


图 10–5 设置拉伸参数（1）

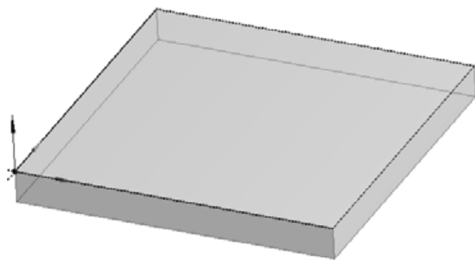


图 10–6 创建的几何

注意：Frozen 为冻结后的几何体，从几何图形上显示为半透明状态。

Step5：单击 Z 轴最大位置处的几何平面，然后单击工具栏中的按钮，再选择 Sketching 选项卡，然后绘制图 10–7 所示的矩形。

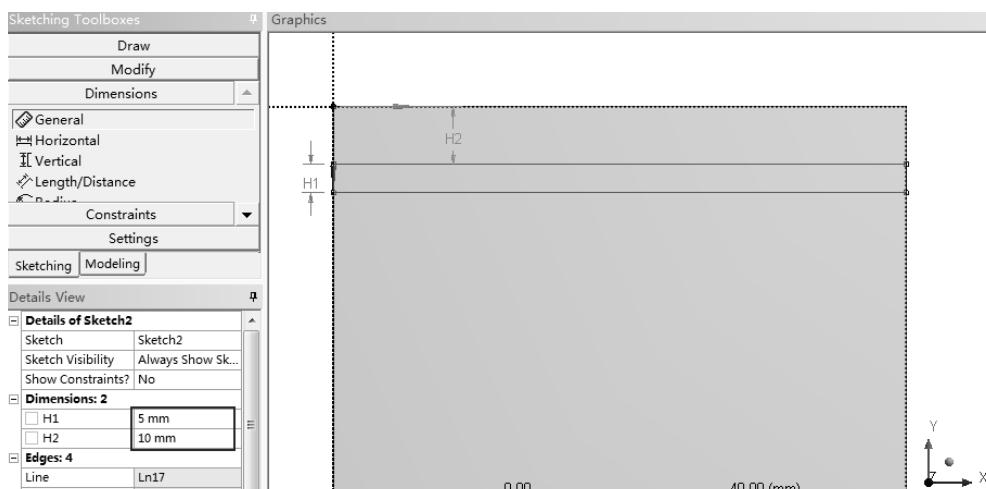


图 10–7 绘制矩形

Step6：为单击 Diementions 选项卡，然后选择 General，标注矩形的长和宽，设置 H1 为 5mm，H2 为 10mm。

Step7：切换到 Modeling 选项卡，选择工具栏中的 Extrude（拉伸）命令，在“Details View”详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中刚刚建立的 Sketch2；在 FD1,Depth（>0）栏中输入拉伸长度为 50mm，其余默认即可，如图 10−8 所示。

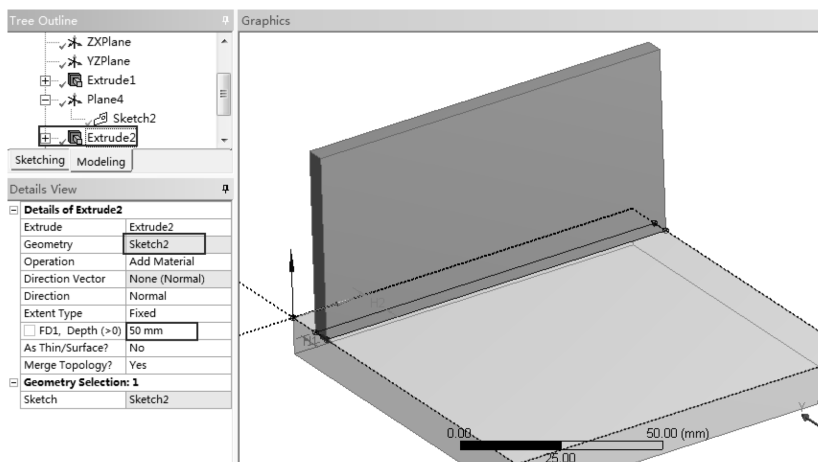


图 10−8 设置拉伸参数（2）

Step8：选择 Create 菜单下面的 Pattern 子菜单，如图 10−9 所示。

Step9：选择 Tree Outline 窗口中的 Pattern1 选项，此时在下面出现图 5−37 所示的 Details View 设置面板中作如下设置：在 Pattern Type 栏中选择 Linear 选项；在 Geometry 栏中选择拉伸的几何实体；在 Direction 栏中确保被冻结几何实体的一条边被选中，并确定好阵列方向，可以通过单击绘图窗口中左下角出现的箭头来调整方向；在 FD1,Offset（>0）栏中输入拉伸长度为 10mm；在 FD3,Copies（>=0）栏中输入数量为 8，其余默认即可，如图 10−10 所示。

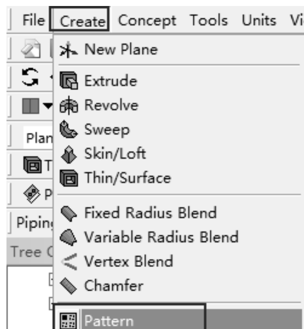


图 10−9 菜单

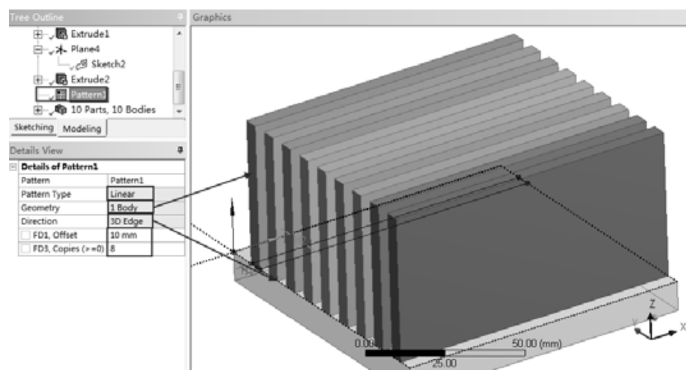


图 10−10 设置阵列参数

Step10：单击 FD1,Offset（>0）栏前面的□图标，此时弹出了 B：Geometry-Design Medeler 对话框，在对话框中的 Parameter Name 栏中输入名称为 DIS，并单击 OK 按钮，此时 FD1,Offset（>0）栏前面的□中将出现 D 的字样，表示此时已被设置为参数化。

Step11：单击 FD3,Copies（>=0）栏前面的□图标，此时弹出了 B：Geometry-Design

Medeler 对话框，在对话框中的 Parameter Name 栏中输入名称为 No，并单击 OK 按钮，此时 FD3,Copies（>=0）栏前面的□中将出现 D 字样，表示此时已被设置为参数化，如图 10-11 所示。

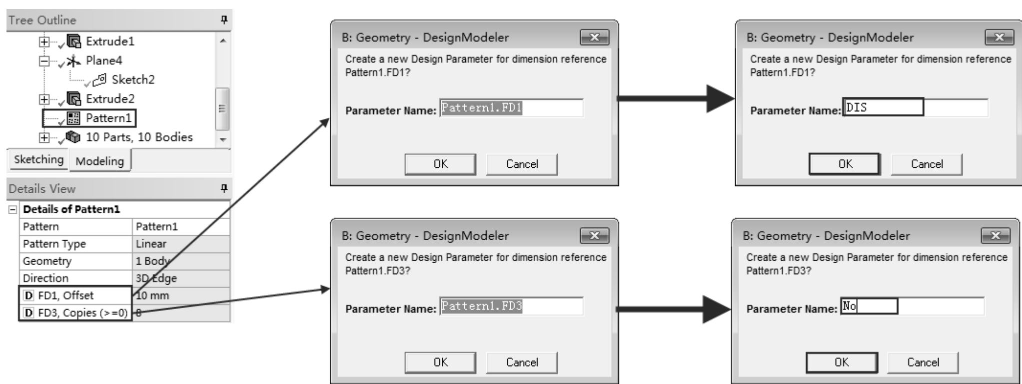


图 10-11 参数化

Step12： 单击工具栏中的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 ex2.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step13： 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面，此时流程图变成图 10-12 所示的参数化流程图。

注：从流程图中可以看出，此时虽然已对几何中的两个参数进行了参数化设置，但是没有对输出进行参数化设置，所以流程图中的Parameter Set栏中仅有一个箭头指向流程图中的A8 Parameters栏，还需要一个输出。

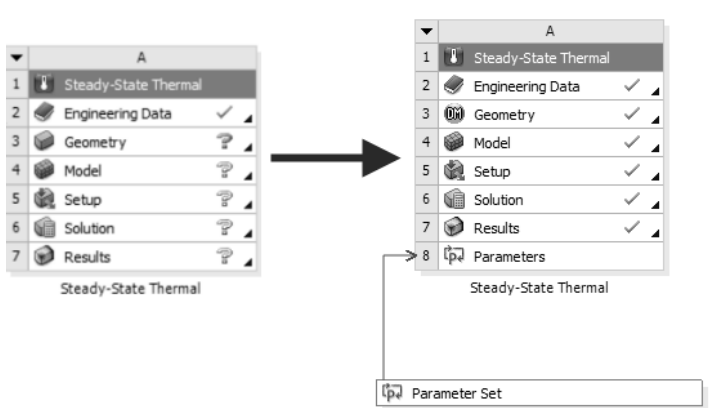


图 10-12 参数化流程图

10.2.4 创建分析项目

Step1： 在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料

设置界面。

Step2：选择工具栏中的 Engineering Data Sources 选项，此时进入图 10–13 所示的材料选择窗口，在 Engineering Data Sources 对话框中选择 Thermal Materials（热材料属性），在出现的 Outline of Thermal Materials 栏中选择 Aluminum（铝），此时在 C8 列中显示出图标，表示当前材料被选中，同时 Properties of Outline Row 8：Aluminum 窗口中显示出铝的导热率，在工具栏中单击 A2:Engineering Data 中的“关闭”按钮，关闭材料设置窗口。

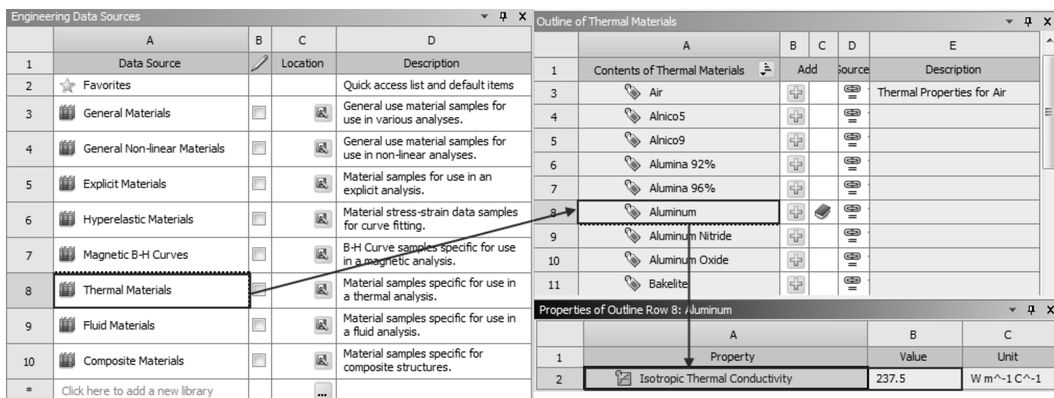


图 10–13　设置材料

Step3：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4：Model 项，进入图 10–14 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

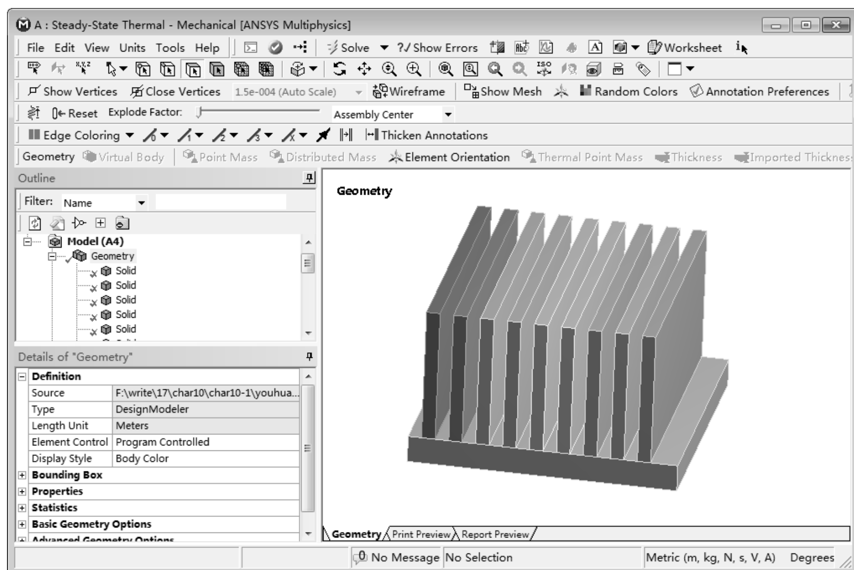


图 10–14　Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的所有 Solid，此时即可在 Details of“Multiple Selection”（参数列表）中给模型添加材料，如图 10–15

所示。

Step5：单击参数列表中 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminum，选择即可将其添加到模型中去。

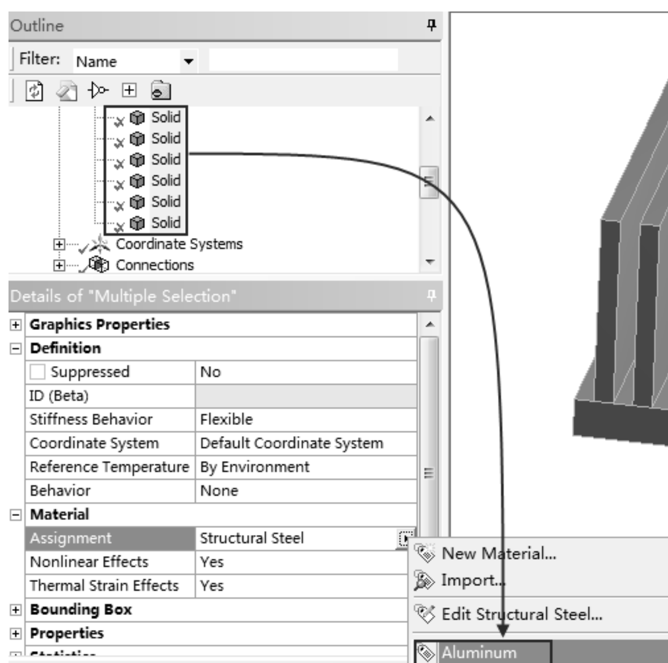


图 10-15　修改材料属性

10.2.5 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Sizing 命令，如图 10-16 所示。

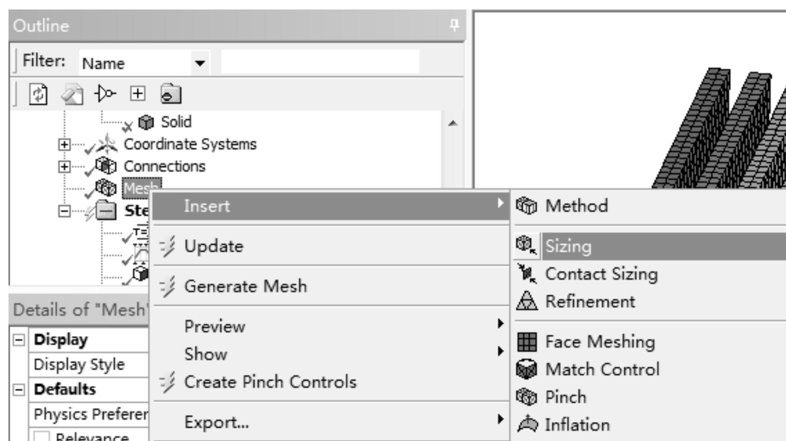


图 10-16　快捷菜单

Step2：在 Details of“Edge Sizing”详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选中几何体的所有边，并单击 Apply 按钮，如图 10−17 所示；在 Element Size 栏中输入网格大小为 2.5e−003m，其余默认即可。

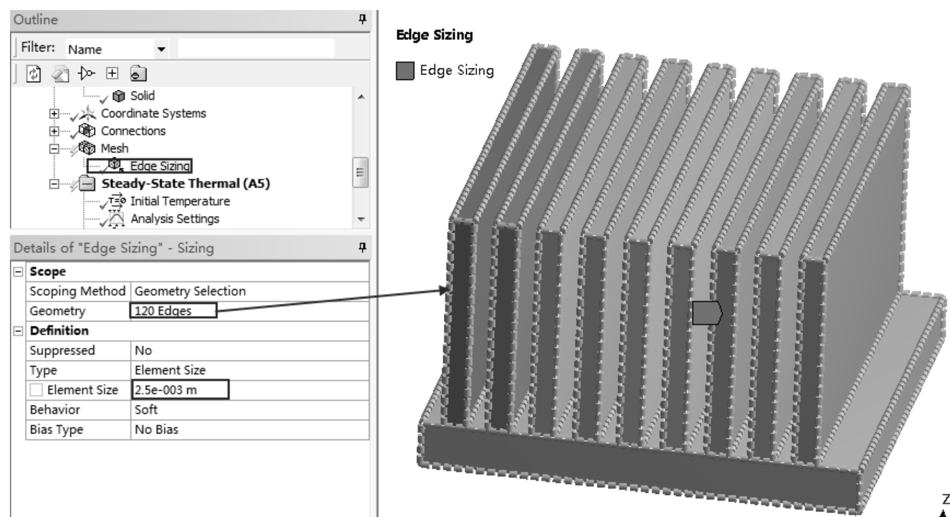


图 10−17　网格设置

Step3：选择 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 10−18 所示。

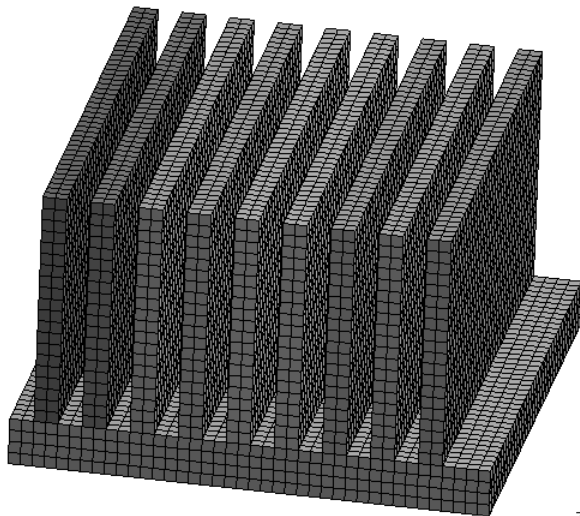


图 10−18　网格效果

10.2.6 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 10−19 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 10−20 所示。

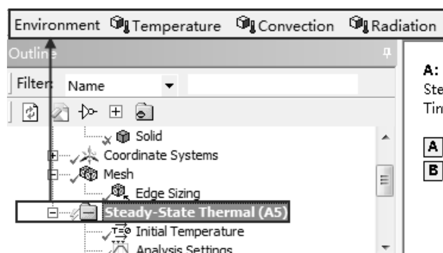


图 10−19 Environment 工具栏

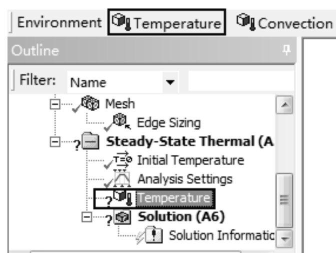


图 10−20 添加载荷

Step3：如图 10−21 所示，选中 Temperature，在出现的 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择实体的背面（即不带散热肋的一个面）；在 Definition→Magnitude 栏中输入 50℃；其余默认即可，完成一个温度的添加。

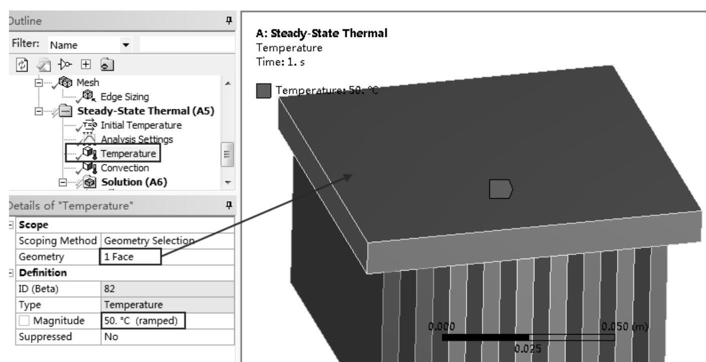


图 10−21 添加温度

Step4：选择工具栏中的 Convection 选项，在 Details of“Convection”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择所有的肋片外表面及几何的四个侧面；在 Film Coefficient 栏中输入 50；在 Ambition Temperature 栏中输入 30℃，其余默认即可，完成另一个对流的添加，如图 10−22 所示。

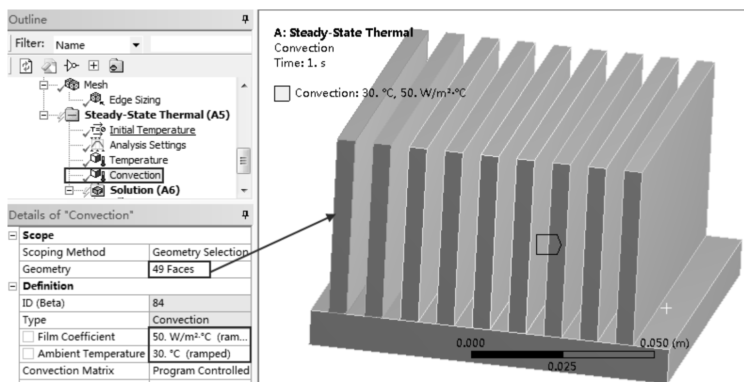


图 10−22 添加对流

Step5：选择 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 10-23 所示。

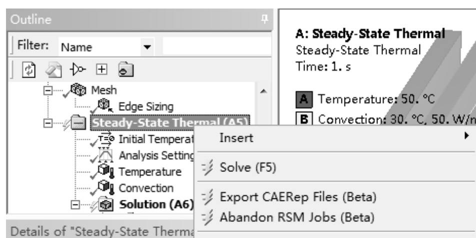


图 10-23　求解

10.2.7 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 10-24 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 10-25 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

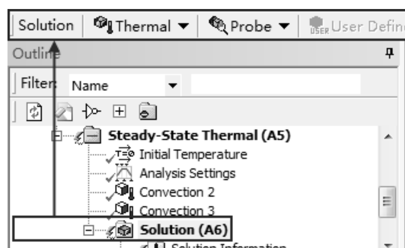


图 10-24　Solution 工具栏

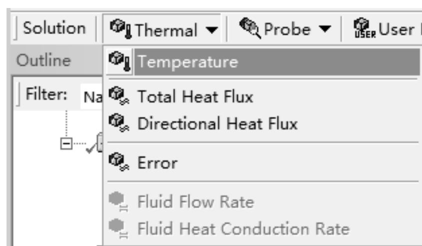


图 10-25　添加温度选项

Step3：选择 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 10-26 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形），如图 10-27 所示。

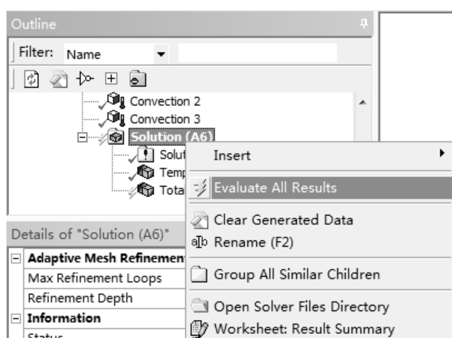


图 10-26　快捷菜单

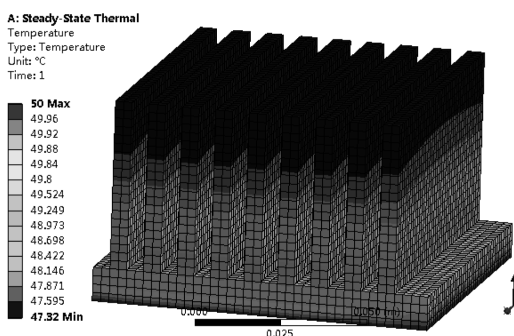


图 10-27　温度分布图

Step5：右键单击 Solution（A6）选项，在弹出来的快捷菜单中依次选择 Insert→Thermal→Temperature，如图 10–28 所示。

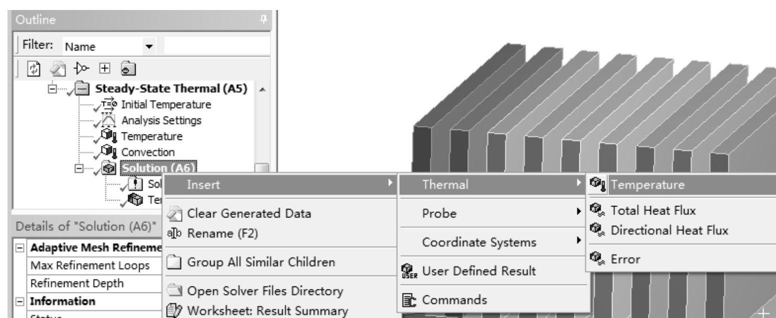


图 10–28　快捷菜单

Step6：如图 10–29 所示，在 Geometry 栏中确保所有肋片的几何实体都被选中。

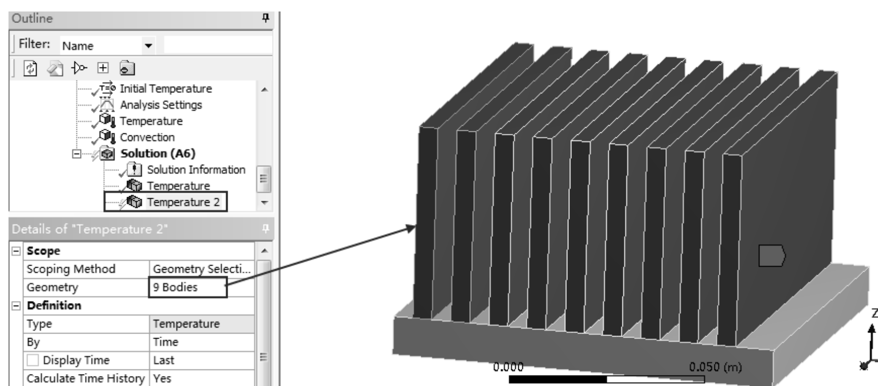


图 10–29　设置

Step7：经过计算可以看出肋片的温度分布如图 10–30 所示。

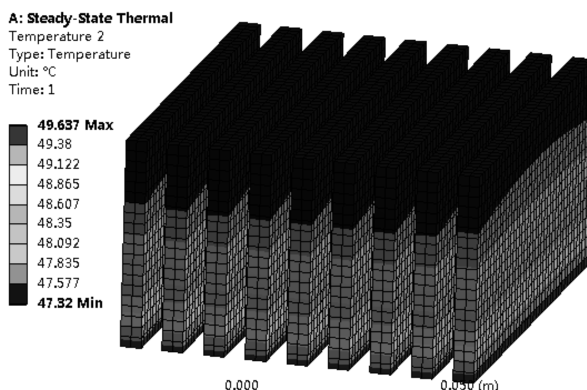


图 10–30　肋片温度分布云图

Step8：下面对肋片的温度分布进行参数化输出设置，如果 10–31 所示，单击

Temperature 2，在下面出现 Details of “Temperature 2”详细设置面板，单击 Results 栏内 Minimum 和 Maximum 前面的□图标，此时两个位置都出现了 P 的标识，表示输出可以参数化。

此时返回到 Workbench 平台，可以看到 Parameter Set 已经封闭，说明此时的优化设计包含了输入及输出的参数化，如图 10−32 所示。

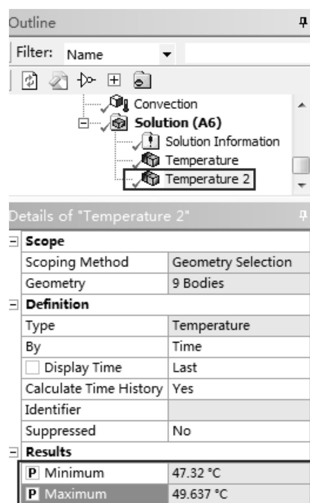


图 10−31　参数化输出设置

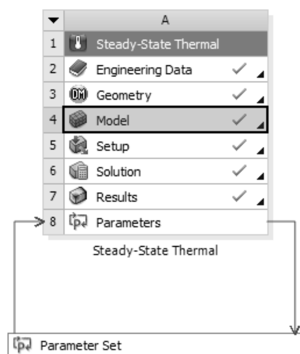


图 10−32　流程图

Step9：右键选择 Parameter Set，弹出图 10−33 所示的快捷菜单，从中选择 Edit 命令，进入参数化设置窗口。

此时可以看到 Parameter Set 窗口中有四个主要区域，如图 10−34 所示。

- Outline of All Parameters：所有参数及传递过程都显示在此区域中。
- Properties of Schematic：Parameter Set：Parameter Set 的控制属性区域。
- Table of Design Points：样点布置区域，在这里可以对感兴趣的尺寸进行输入；
- Chart：No data：图标显示区域，当前无图标显示。

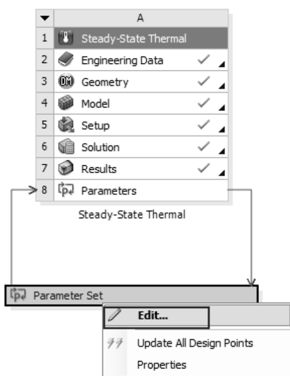


图 10−33　选择快捷菜单

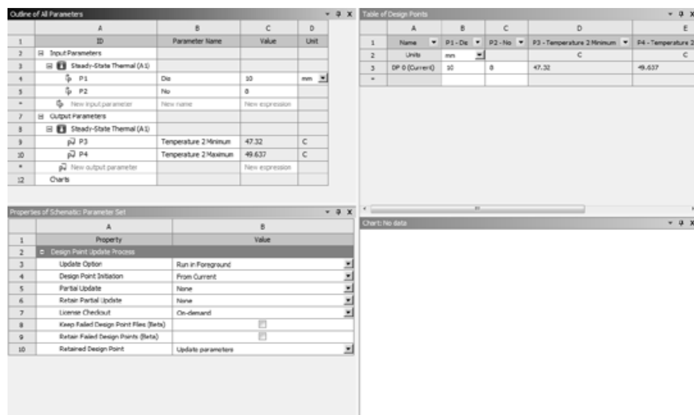


图 10−34　Parameter Set 窗口

Step10：在 Table of Design Points 窗口中，默认的 P1-Dis 及 P2-No 已计算完成，下面再次布置 11 个样本点，样本点的 P1 分别为从 10 到 5，P2 分别为从 8 到 9，如图 10-35 所示；

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - Dis	P2 - No	P3 - Temperature 2 Minimum	P4 - Temperature 2 Maximum	Retain	Retained Data	Note
2	Units	mm		C	C			
3	DP 0 (Current)	10	8	47.32	49.637	☑	✓	
4	DP 1	9	8			☐		
5	DP 2	8	8			☐		
6	DP 3	7	8			☐		
7	DP 4	6	8			☐		
8	DP 5	5	8			☐		
9	DP 6	10	9			☐		
10	DP 7	9	9			☐		
11	DP 8	8	9			☐		
12	DP 9	7	9			☐		
13	DP 10	6	9			☐		
14	DP 11	5	9			☐		
*						☐		

图 10-35　布置样本点

Step11：单击 Workbench 平台中工具栏中的 Update All Design Points 按钮，执行所有样本点的计算，此时单击 Workbench 平台下的 Hide Progress 按钮可以弹出图 10-36 所示的计算进度查询窗口，如果读者随时想停止计算进程，可以单击右侧的按钮。

Progress

	A	B	C
1	Status	Details	Progress
2	Updating the Solution component in Steady-State Thermal for Design Point 3		

图 10-36　计算进度查询

Step12：经过一段时间的计算，所布置的 11 个样本点都被计算出来，并将最高温度及最低温度均显示到图 10-37 所示的窗口中。

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - Dis	P2 - No	P3 - Temperature 2 Minimum	P4 - Temperature 2 Maximum	Retain	Retained Data	Note
2	Units	mm		C	C			
3	DP 0 (Current)	10	8	47.32	49.637	☑	✓	
4	DP 1	9	8	47.287	49.633	☐		
5	DP 2	8	8	47.247	49.618	☐		
6	DP 3	7	8	47.196	49.601	☐		
7	DP 4	6	8	47.127	49.55	☐		
8	DP 5	5	8	49.337	49.934	☐		
9	DP 6	10	9	47.32	49.637	☐		
10	DP 7	9	9	47.287	49.633	☐		
11	DP 8	8	9	47.247	49.619	☐		
12	DP 9	7	9	47.196	49.603	☐		
13	DP 10	6	9	47.127	49.55	☐		
14	DP 11	5	9	49.345	49.936	☐		
*						☐		

图 10-37　样本点结果



Step13：右键单击 DP4 样本点，弹出图 10−38 所示的快捷菜单，从中选择 Copy inputs to Current 选项。

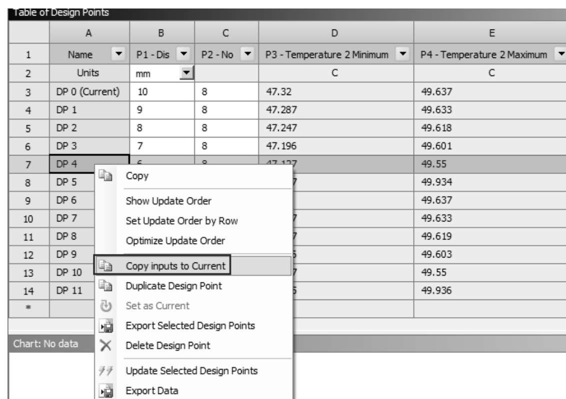


图 10−38　快捷菜单 1

Step14：此时 DP4 将变成 DP0（Current），右键单击该项，弹出图 10−39 所示的快捷菜单，从中选择 Update Selected Design Points 选项，执行计算。

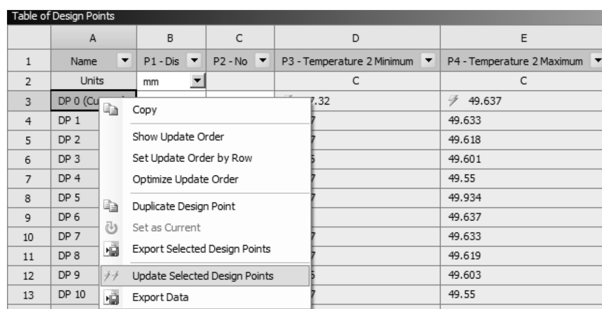


图 10−39　快捷菜单 2

Step15：单击工具栏 Parameter Set 上的“关闭”按钮，回到 Workbench 平台中，双击 A7，然后选择 Temperature 2 的云图，此时显示出肋片当前样本点的温度分布，如图 10−40 所示。

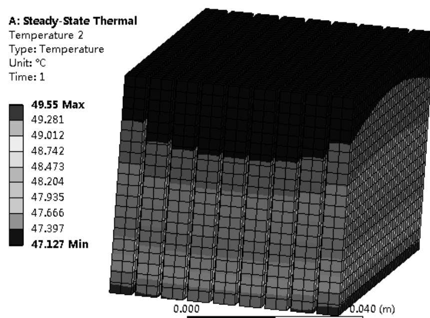


图 10−40　肋片温度分布云图

Step16：返回到 Workbench 平台中，选择 Toolbox 工具栏中的 Design Exploration→Response Surface 选项，此时将添加一个响应面分析流程图，如图 10−41 所示。

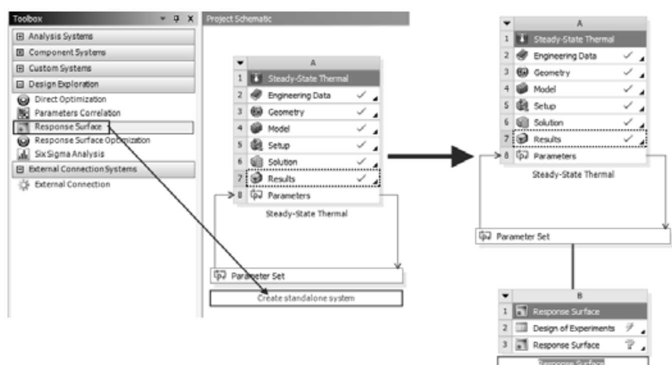


图 10-41 响应面分析流程

Step17： 右键选择 B2：Design of Experiments，弹出图 10-42 所示的快捷菜单，从中选择 Update。

Step18： 右键选择 B3：Response Surface，弹出图 10-43 所示的快捷菜单，从中选择 Update。

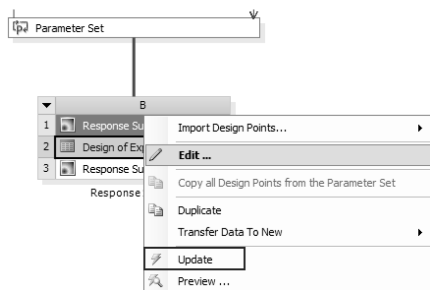


图 10-42 快捷菜单 3

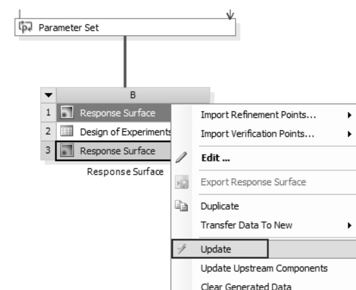


图 10-43 快捷菜单 4

Step19： 双击 B3：Response Surface，进入 Outline of Schematic B3：Response Surface 窗口，单击 Metrics 下面的 Goodness Of Fit 选项，右侧弹出各个计算的质量与推荐度，以☆的数量为推荐度，标记×的为不推荐的样本点，如图 10-44 所示。

Table of Schematic B3: Response Surface

	A	B	C
1		P3 - Temperature 2 Minimum	P4 - Temperature 2 Maximum
2	Coefficient of Determination (Best Value = 1)		
3	Learning Points	0.99992	1
4	Cross-Validation on Learning Points	0.99975	0.99216
5	Root Mean Square Error (Best Value = 0)		
6	Learning Points	0.00036312	2.1934E-08
7	Cross-Validation on Learning Points	0.00063268	0.0020566
8	Relative Maximum Absolute Error (Best Value = 0%)		
9	Learning Points	1.8661	0
10	Cross-Validation on Learning Points	2.8147	×× 19.009
11	Relative Average Absolute Error (Best Value = 0%)		
12	Learning Points	0.69089	0
13	Cross-Validation on Learning Points	1.2376	6.3079

图 10-44 Goodness Of Fit

Step20： 单击 Response 栏，在 Properties of Outline A16：Response 窗口中的 Mode 栏中选择 3D，其余默认即可，此时将显示图 10-45 所示的 3D 响应曲面图。

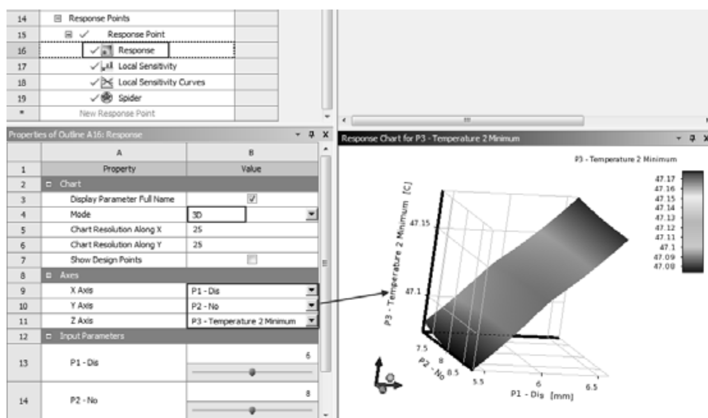


图 10-45 3D 响应曲面图

Step21：单击 Local Sensitivity 栏，Properties of Outline A17：Local Sensitivity 窗口保持默认即可，此时将显示图 10-46 所示的 Local Sensitivity 图。

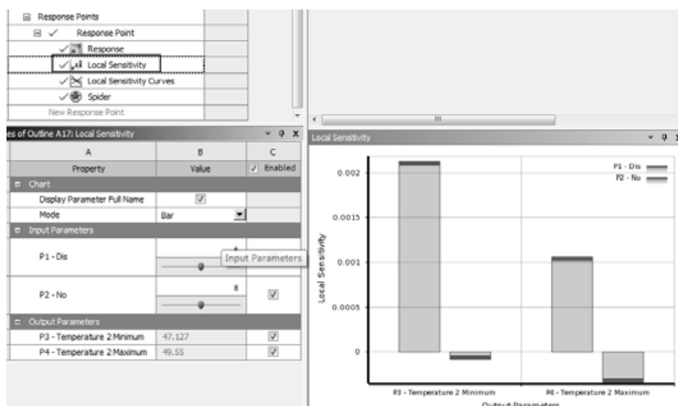


图 10-46 Local Sensitivity 图

Step22：单击 Local Sensitivity Curves 栏，Properties of Outline A18：Local Sensitivity Curves 窗口保持默认即可，此时将显示图 10-47 所示的 Local Sensitivity Curves 图。

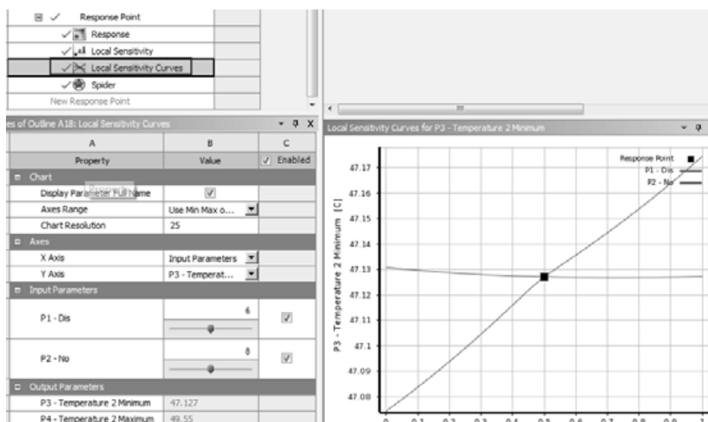


图 10-47 Local Sensitivity Curves 图

Step23：单击 Spider 栏，Properties of Outline A19：Spider 窗口保持默认即可，此时将显示图 10-48 所示的 Spider 图。

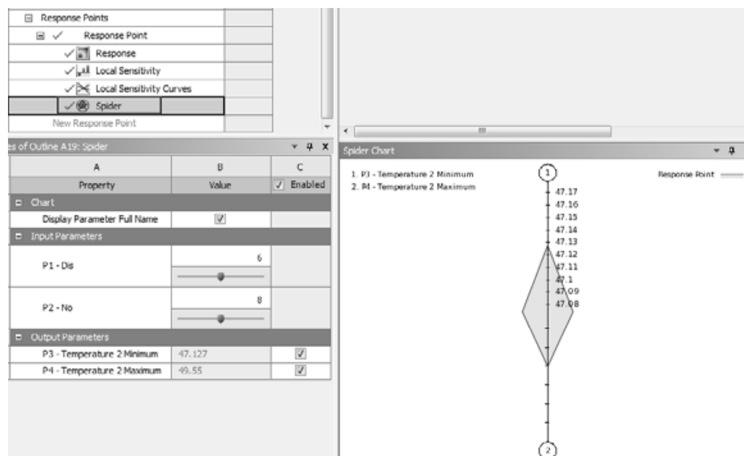


图 10-48　Spider 图

10.2.8 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

10.3　本章小结

本章节通过典型实例介绍了散热片肋片的优化分析操作过程，在分析过程中考虑了与周围空气的对流换热边界，在后处理工程中得到了温度分布云图。通过本章节的学习，读者应该掌握 ANSYS Workbench 平台优化分析的一般操作过程。

第 11 章　热应力耦合分析

热应力是自然界中普遍存在但又经常被分析人员忽略的一种现象，本章节主要对热产生的应力作用、热对结构固有频率的影响、交变热对结构产生的热疲劳现象进行了介绍与分析，旨在提高读者对热应力相关知识的认识程度。

知识点 \ 学习目标	了　解	理　解	应　用	实　践
热应力分析的基本概念	√	√		
热应力分析操作方法		√	√	√
热应力分析的应用领域		√	√	√

11.1　热应力概述

力和热是自然界和人类生活实践中广泛存在的两种能量表现形式，也是工程机械设备中十分常见的能量传递现象。在工程和科技装置中，同时承受外力和高温作用的例子不胜枚举，如汽轮机、锅炉、燃气轮机、内燃机、核动力装置以及火箭、高速飞行器等。

需要指出的是，仅有温度的变化，不一定会在物体内产生应力；只有温度发生变化所引起的膨胀或收缩受到约束时，才会在物体内产生应力，这种无外力作用而是由于温度变化引起的热变形受到约束而产生的应力，称为热应力或温度应力。例如在自由膨胀时，长度和直径方向的伸长量分别为 $\Delta t = \alpha(t_1 - t_0)l$ 及 $\Delta d = \alpha(t_1 - t_0)d$ ，在长度和直径方向的应变为

$$\begin{cases} \varepsilon_l = \dfrac{\Delta l}{l} = \alpha(t_1 - t_0) \\ \varepsilon_d = \dfrac{\Delta d}{d} = \alpha(t_1 - t_0) \end{cases} \tag{11-1}$$

即温度由 t_0 升至 t_1 时，各方向的应变均为

$$\varepsilon = \alpha(t_1 - t_0)t \tag{11-2}$$

式中，α 为材料的线膨胀系数，其值随材料而有不同的数值，并且随温度变化，当温度变化不大时，α 可视为常数。

热胀冷缩是许多物体共有的属性，在边长为 1cm 的各向同性立方体中，因均匀受热而自由膨胀或因均匀冷却而自由收缩时，在长、宽、高方向会产生同样的伸长或收缩，即仅有纵向变形，但无剪切变形。

以金属棒为例，如果金属棒的膨胀是自由的，即不受约束的，则不会产生热应力。但如果金属棒被置于两个刚体壁之间并固定住两端，那么金属棒在受热温度升高到 t_1 后，因受到刚体壁的阻止，无法膨胀，就会在金属棒内产生压缩热应力。可见，虽然无外力的作用，但

若温度变化引起的热变形受到外部的约束，也会在物体内产生应力。

另一种情况是，在同一物体内部，如果温度的分布是不均匀的，即使物体不受外界约束，但由于各处的温度不同，每一部分因受到不同温度的相邻部分的影响，不能自由伸缩，也会在内部产生热应力。例如汽轮机的气缸在冷态启动时，内部因受蒸汽的直接或间接加热，温度较外壁高，但内侧的膨胀被温度较低的外侧所约束，结果使内壁产生压应力，外壁产生拉应力；相反，在汽轮机停机时，随着蒸汽参数的降低，内壁首先开始冷却，外壁则缓慢地冷却，结果在内壁产生拉应力，则外壁产生压应力。

还有一种情况，构件是由若干不同材料的零件组合起来的，即使构件受到相同的加热或冷却，但由于各种零件的膨胀系数不同，或由于膨胀方式不同，造成零件相互之间的制约，不能自由胀缩，从而各自产生不同的热应力。例如汽轮机设备中相互配合以保证气缸可靠工作的法兰与螺栓，法兰直接受蒸汽加热，温度较高，而螺栓温度较低，由于两者的材料与温度不一样，使法兰的热膨胀大于螺栓的热膨胀，结果两者均产生一定的热应力。

本节主要侧重研究温度变化的作用，即弹性体在外力、温度共同作用下，应力应变的变化规律。温度变化，或是由于与外部的传热引起，或是由于变形过程产生热量引起，这样的过程严格地讲是不可逆的，但为了简化起见，都假设是可逆的。

11.2 热应力基本理论

为了进一步了解热应力的概念、产生原因、约束方式及求解原理，下面用材料力学的方法讨论几个简单的热应力例子。

1. 棒两端约束时的热应力问题

长度为 l 、直径为 d 的圆棒，两端固定在刚体壁处，不能沿长度自由度伸缩，如图 11−1 所示。

当棒由初始温度 t_0 冷却到 t_1 时，在自由状态下，棒的缩短量为 $\Delta l = \alpha(t_0 - t_1)l$ 。

其中，Δl 是无约束时棒与壁之间应出现的间隙。由于棒两端是固定的，因此刚体壁对棒产生拉伸作用，拉伸力为 P ，故棒内的拉伸应力为

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi d^2} \tag{11-3}$$

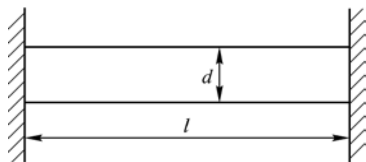


图 11−1 预应力模型

另外，棒被拉伸后，其应变及相应的应力是

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha(t_0 - t_1) \tag{11-4}$$

$$\sigma = \varepsilon E = \alpha E(t_0 - t_1) \tag{11-5}$$

式（11−3）与式（11−5）应相等，由此解出

$$P = \frac{\pi d^2}{4}\alpha E(t_0 - t_1) \tag{11-6}$$

将式（11−6）代回式（11−3），得到棒的热应力值为

$$\sigma = \varepsilon E(t_0 - t_1) = \alpha E t \qquad (11\text{–}7)$$

其中，t 表示温度的变化。式（11–7）对于圆棒加热也是适用的，只是此时棒受压缩，σ 为负值。

2. 两根长度相同的棒互相约束

图 11–2 所示为两根长度都等于 l 但材料不同的棒连接在一起，不能相对移动，也不发生弯曲。两棒的初始温度都等于 t_0，最终温度分别为 t_1 和 t_2，且棒内的温度均匀分布。

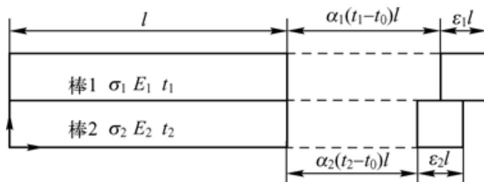


图 11–2　两个棒相互约束

为了讨论方便，不妨假设 $t_1 > t_2$ 及 $\alpha_1 > \alpha_2$（下标 1 和 2 分别对应棒 1 和棒 2）。

如果两棒之间是没有相互约束的，则棒 1 的自由膨胀量 $\Delta l_1 = \alpha_1(t_1 - t_0)l$，棒 2 的自由膨胀量 $\Delta l_2 = \alpha_2(t_2 - t_0)l$。

故 $\Delta l_1 > \Delta l_2$，但由于两棒固定在一起，长度方向不能相对移动，因此棒 1 的实际膨胀值小于自由膨胀值，而棒 2 的实际膨胀值大于自由膨胀值。即棒 1 受压应力 σ_1 的作用，相应的应变 $\varepsilon_1 = \dfrac{\sigma_1}{E_1}$，缩短量 $\varepsilon_1 l = \dfrac{\sigma_1 l}{E_1}$；棒 2 受拉应力 σ_2 的作用，相应的应变 $\varepsilon_2 = \dfrac{\sigma_2}{E_2}$，缩短量 $\varepsilon_2 l = \dfrac{\sigma_2 l}{E_2}$。

棒 1 的最终伸长量为
$$\alpha_1(t_1 - t_0)l + \varepsilon_1 l = \alpha_1(t_1 - t_0)l + \frac{\sigma_1 l}{E_1} \qquad (11\text{–}8)$$

棒 2 的最终伸长量为
$$\alpha_2(t_2 - t_0)l + \varepsilon_2 l = \alpha_2(t_2 - t_0)l + \frac{\sigma_2 l}{E_2} \qquad (11\text{–}9)$$

注意上两式中，ε_1、σ_1、ε_2、σ_2 包含有符号，拉应力为正号，压应力为负号。

由于两棒长度保持相等，故有
$$\alpha_1(t_1 - t_0)l + \frac{\sigma_1 l}{E_1} = \alpha_2(t_2 - t_0)l + \frac{\sigma_2 l}{E_2} \qquad (11\text{–}10)$$

此时两棒处于平衡状态，因无其他外力作用，棒 1 所受的压缩力与棒 2 所受到的拉伸力相等，即
$$\sigma_1 A_1 = \sigma_2 A_2 \qquad (11\text{–}11)$$
式中，A_1、A_2 分别为棒 1 与棒 2 的横截面积。

由式（11–8）和式（11–9）联立解得

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_1 E_1(t_1 - t_0)[1 - \dfrac{\alpha_2(t_2 - t_0)}{\alpha_1(t_1 - t_0)}]}{1 + \dfrac{A_1 E_1}{A_2 E_2}} = -k\alpha_1 E_1(t_1 - t_0) \qquad (11\text{–}12)$$

$$\sigma_2 = k\alpha_1 E_1(t_1 - t_0)\frac{A_1}{A_0} \qquad (11\text{–}13)$$

其中，k 值为

$$k=\frac{1-\dfrac{\alpha_2(t_2-t_0)}{\alpha_1(t_1-t_0)}}{1+\dfrac{A_1E_1}{A_2E_2}} \tag{11-14}$$

k 称为约束系数，若 $k>0$，则 $\sigma_1<0$、$\sigma_2>0$，棒 1 为压应力，棒 2 为拉应力；若 $k<0$，则 $\sigma_1>0$、$\sigma_2<0$。

以上讨论的是两棒长度相等的情形，如果两棒长度不相等，只要是相互约束的，就可按与上相同的原理求解。

11.3 热应力案例一——瞬态热应力

本节将通过 ANSYS Workbench 平台对瞬态热应力的操作过程进行详细介绍。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中瞬态热应力分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter11\char11−1\TEMP_DEFORMATION.wbpj

11.3.1 热应力案例描述

某平板尺寸为 120mm×80mm×4mm，如图 11−3 所示，其密度为 $2500\,kg/m^3$，上下表面的对流换热系数为 $180\,W/(m^2\cdot K)$，4 个侧面边界为 $90\,W/(m^2\cdot K)$，泊松比为 0.17，其他参数（如比热、热膨胀率、弹性模量、导热率）均随温度变化。现将些金属板加热到 600 ℃并突然放置到 20 ℃的空气中进行淬冷，忽略热传导和热辐射，将传热过程简化为对流传热。求板淬冷过程中的热应力变化情况，材料参数见表 11−1。



图 11−3 模型

表 11−1 材料参数

温度/ ℃	20	100	200	300	400	500	600
比热 /J·(kg·℃)	720	838	946	1036	1084	1108	1146
热膨胀系数/10^{-7}·$℃^{-1}$	3.9	5.15	5.68	6.12	5.67	5.40	5.04
弹性模量 GPa	73	74	75	76	77	78	79
导热率/ W·$(m·K)^{-1}$	1.38	1.47	1.55	1.67	1.84	2.04	2.46

11.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，创建一个稳态热分析项目，然后右键单击 A6，在弹出的快捷菜单中插入

一个 Transient Thermal（瞬态热分析）项目，再右键单击 B6，在弹出的快捷菜单中插入一个 Transient Structural（瞬态结构分析）项目，此时即可在 Project Schematic（项目管理区）创建图 11−4 所示热应力分析项目流程。

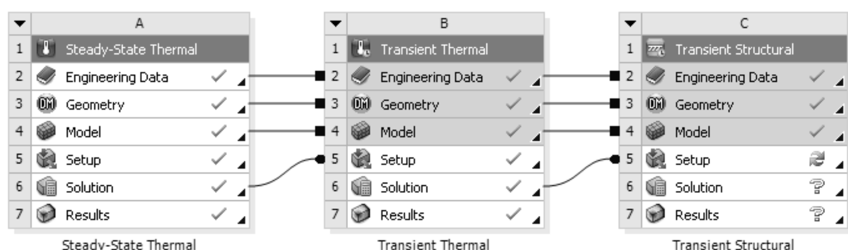


图 11−4　热应力分析流程

11.3.3　创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 项上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 11−5 所示，此时会进入 DesignModeler 几何建模窗口，在 DesignModeler 几何建模窗口中可以进行几何建模与模型有限元分析的前处理及几何修复等工作任务。

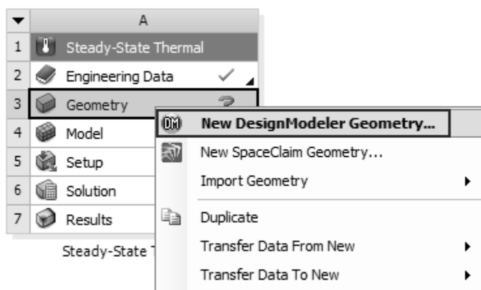


图 11−5　导入几何体

Step2：在启动的 DesignModeler 几何建模窗口中进行几何创建。建模前首先要设置模型的单位制，根据案例的模型大小，选择 Units 菜单下面的 millimeter 选项，设置当前模型的长度单位制为 mm；然后在模型树中选择 XYPlane，在下面的选项卡中选择 Sketching 选项卡，进入草绘控制界面，选择 Draw 子选项卡中的 Rectangular（矩形）命令；接着将矩形的第一个角点定义在坐标原点上，即鼠标单击草绘平面的原点，然后向右上角移动鼠标拉开一定的距离后定义第二个角点，此时创建了一个矩形（在第一坐标系中）。

Step3：单击 Dimensions 子选项卡，对几何尺寸进行标注和控制，此时默认的 General 尺寸标注已被选中，首先单击 X 轴上的一条边，在 Details View 窗口中出现了 H1 标记，在 H1 栏中输入长度为 80mm；单击最右侧的竖直方向的直线，此时 Details View 窗口中出现了 V2 标记，在 V2 栏中输入长度为 120mm，此时几何尺寸将根据标注的大小进行自动调节，如图 11−6 所示。

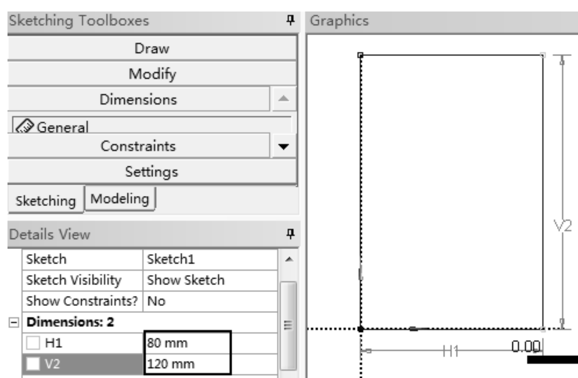


图 11-6　草绘及标注

Step4: 草绘完成后，单击 Modeling 选项卡切换到实体建模窗口，然后选择工具栏中的 Extrude（拉伸）命令，在弹出图 11-7 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Details of Extrude1 下面的 Geometry 栏中选择刚才建立的草绘 Sketch1；在 FD1,Depth（>0）栏中输入厚度为 4mm，其余默认即可，并选择工具栏中的 Generate 命令生成几何实体，如图 11-7 所示。

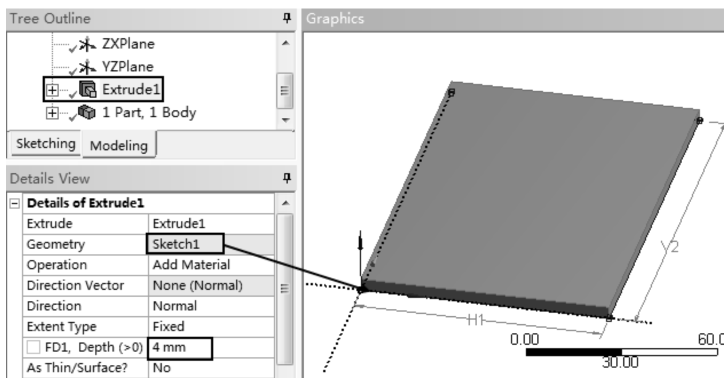


图 11-7　几何实体

Step5: 单击 DesignModeler 几何建模窗口中工具栏上的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 non_linear.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step6: 回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

11.3.4 材料设置

Step1: 在 Workbench 主界面中双击 A2：Engineering Data，进入 Mechanical 热应力分析的材料设置界面。

Step2: 在 Outline of Schematic A2，B2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时单击 Properties of Outline Row 3：mat 下面的

Isotropic Thermal Conductivity 选项，在右侧的 Table of Properties Row 18：Isotropic Thermal Conductivity 栏中的 Temperature 行中分别输入 20、100、200、300、400、500、600；

在后面的 Thermal Conductivity 栏中分别输入 1.38、1.47、1.55、1.67、1.84、2.04、2.46；

同样操作添加一个 Specific Heat（比热）到 mat 中，并在 Table of Properties Row 21：Specific Heat 栏中的 Temperature 行中分别输入 20、100、200、300、400、500、600；

在后面的 Specific Heat 栏中分别输入 720、838、946、1036、1084、1108、1146；

然后加入 Density 材料属性，并在 Density 栏中输入为 2500。

输入完成后的热属性如图 11-8 所示，通过右下角的曲线可以看出热参数是随温度而变化的。

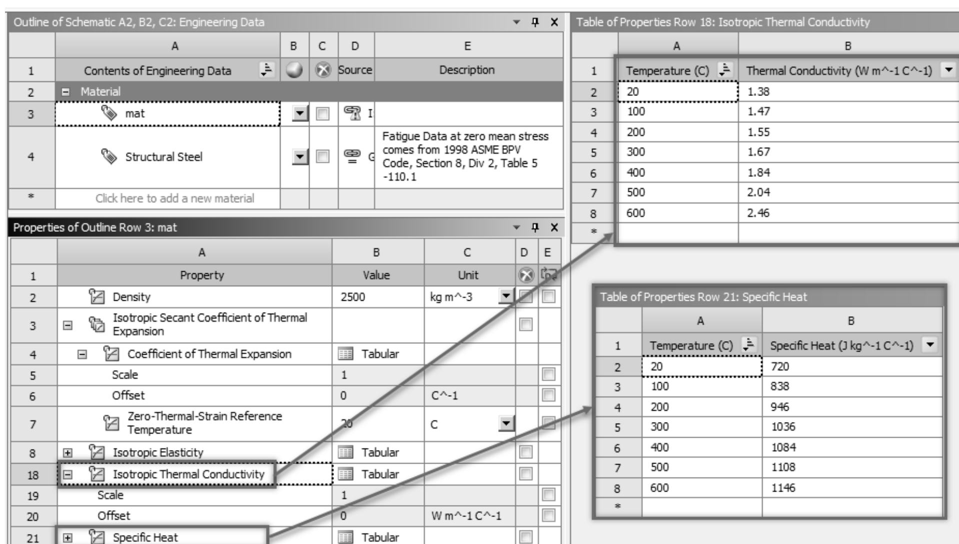


图 11-8 设置材料热属性（1）

以同样的操作添加一个 Coefficient of Thermal Expansion（热膨胀系数）到 mat 中，并在 Table of Properties Row 4：Coefficient of Thermal Expansion 栏中的 Temperature 行中分别输入 20、100、200、300、400、500、600；

在后面的 Coefficient of Thermal Expansion 栏中分别输入 3.9E-07、5.15E-07、5.68E-07、6.12E-07、5.67E-07、5.4E-07、5.04E-07；

在 Reference Temperature 栏中输入参考温度为 20℃；

继续以同样的操作添加一个 Isotropic Elasticity（各向同性弹性模量）到 mat 中，并在 Table of Properties Row 8：Isotropic Elasticity 栏中的 Temperature 行中分别输入 20、100、200、300、400、500、600；

在后面的 Young’s Modulus 栏中分别输入 73、74、75、76、77、78、79，并在 Poisson’s Radio 栏的不同温度下均输入 0.17；

输入完成后的物理属性如图 11-9 所示，通过右下角的曲线可以看出物理参数是随温度而变化的。

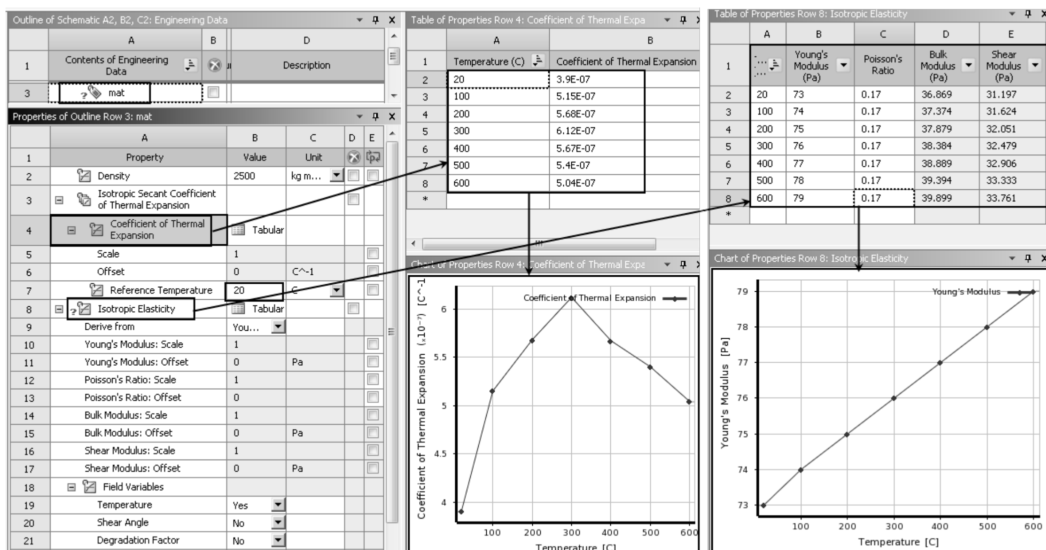


图 11−9 设置材料物理属性（2）

Step3：材料热物理属性设置完成后，关闭材料属性设置窗口。双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 11−10 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

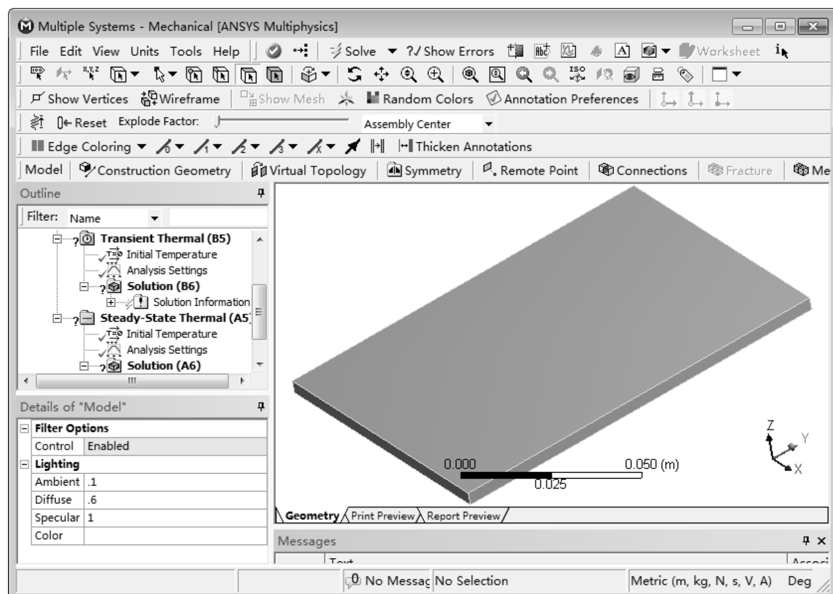


图 11−10 Mechanical 界面

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 11−11 所示。

Step5：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

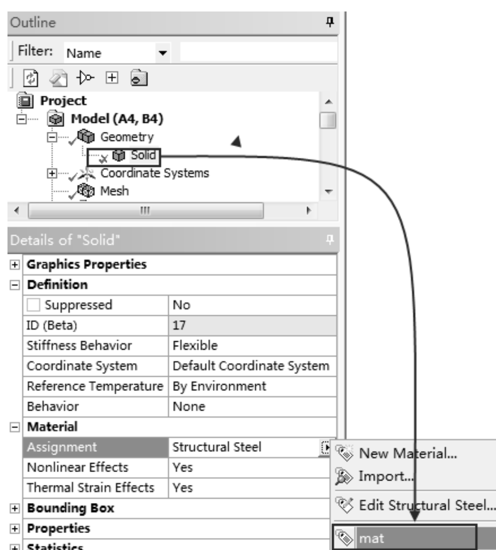


图 11-11　修改材料属性

11.3.5 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置面板的 Element Size 栏中输入 1.e−003m，如图 11-12 所示。

Step2：右键单击 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 11-13 所示。

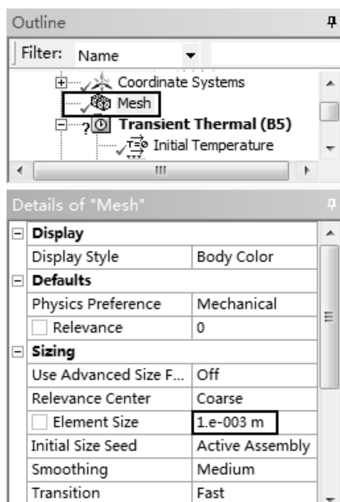


图 11-12　网格设置

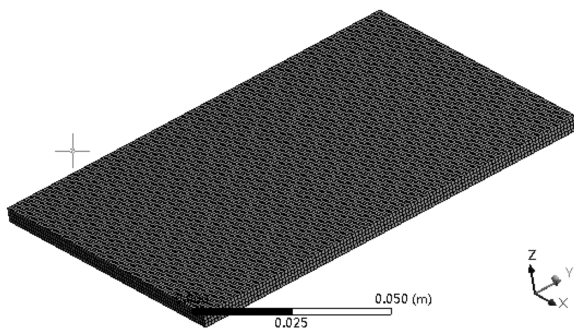


图 11-13　网格效果

11.3.6 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选

项，此时会出现图 11-14 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 11-15 所示。

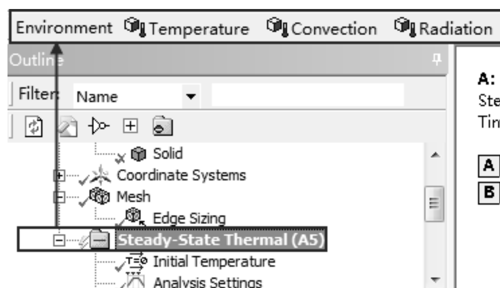


图 11-14　Environment 工具栏

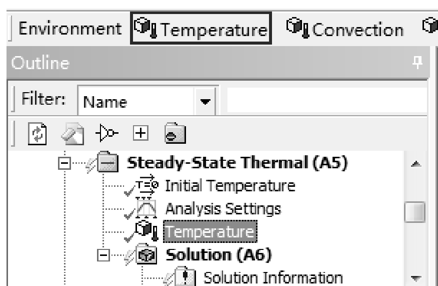


图 11-15　添加载荷

Step3：如图 11-16 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择球体；在 Definition→Magnitude 栏中输入 600；其余默认即可，完成一个温度的添加。

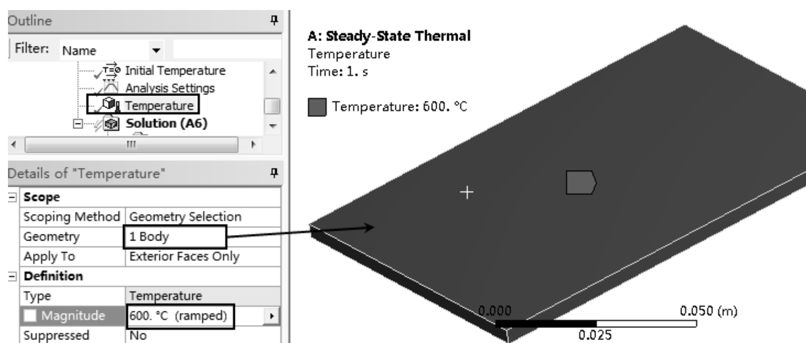


图 11-16　设置

Step4：右键单击 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-17 所示。

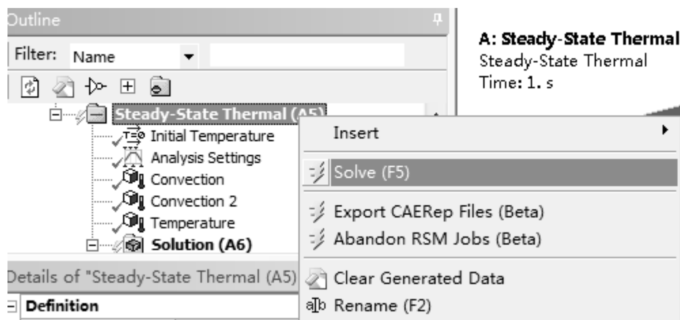


图 11-17　求解

11.3.7 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 11-18 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 11-19 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

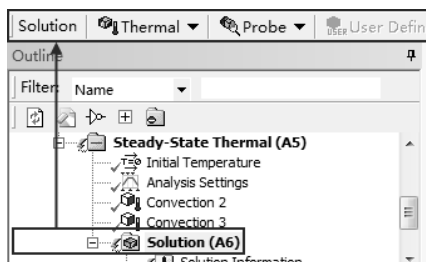


图 11-18　Solution 工具栏

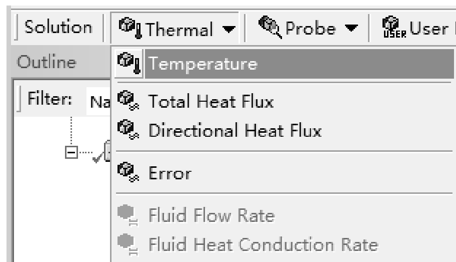


图 11-19　添加温度选项

Step3：右键单击 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11-20 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 11-21 所示。

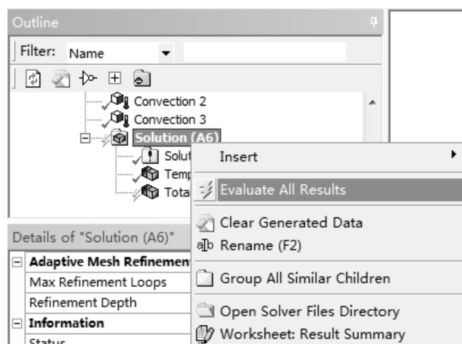


图 11-20　快捷菜单

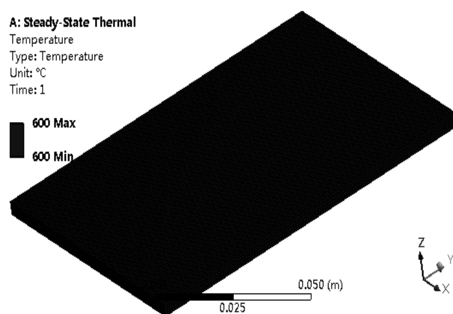


图 11-21　温度分布

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在出现的 Environment 工具栏中单击两次 Convection 选项。

Step6：单击 Convection 选项，然后在 Details of “Convection”面板中作如下设置，如图 11-22 所示：在 Geometry 栏中确定上下两个表面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 180；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 20℃，其余默认即可。

Step7：单击 Convection2 选项，然后在 Details of “Convection2”窗口中作如下设置，如图 11-23 所示：在 Geometry 栏中确定四周四个表面被选中；在 Film Coefficient 栏

中输入对流系数为 90；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 20℃，其余默认即可。

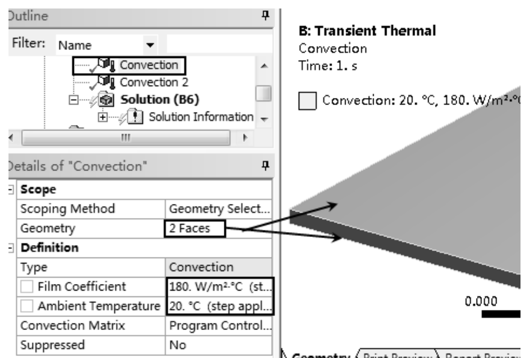


图 11-22 对流 1

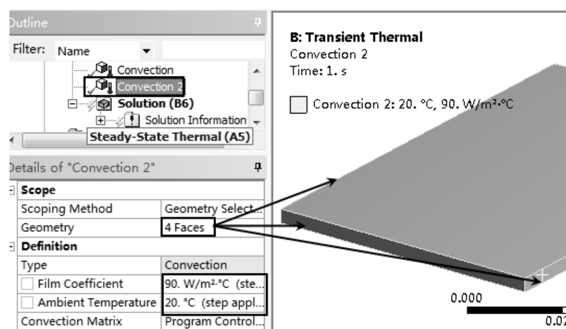


图 11-23 对流 2

Step8：设置分析选项。单击 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在图 11-24 所示的分析选项设置面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 10s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 200，其余默认即可。

Step9：右键单击 Outlines（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-25 所示。

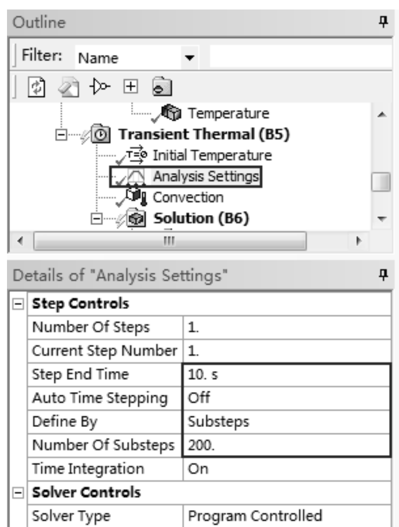


图 11-24 设置

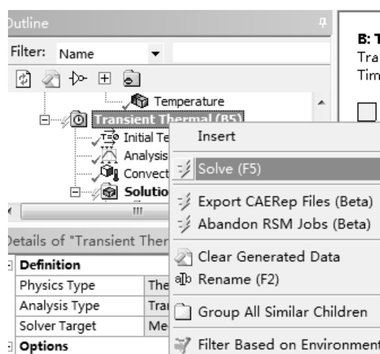


图 11-25 求解

Step10：单击 Solution→Solution Information→Temperature - Global Maximum 和 Temperature - Global Minimum，将显示图 11-26 所示的降温曲线图，从图中可以看出 10s 的时间，平板的最高温度降到了 460.2℃，最低温度降到了 324.69℃，如果想将温度降到环境温度（即 20℃），还需要一段时间。

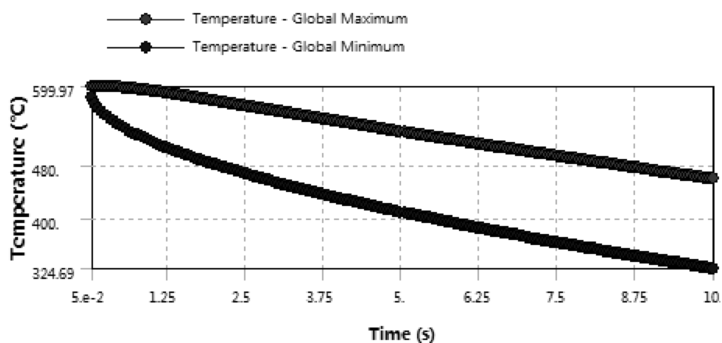


图 11–26 降温曲线图

Step11：添加一个 Temperature 后处理命令，通过后处理可以看出图 11–27 所示的各个时刻的温度值，可以看出时间为 5.3s 时的温度为 198.99℃。

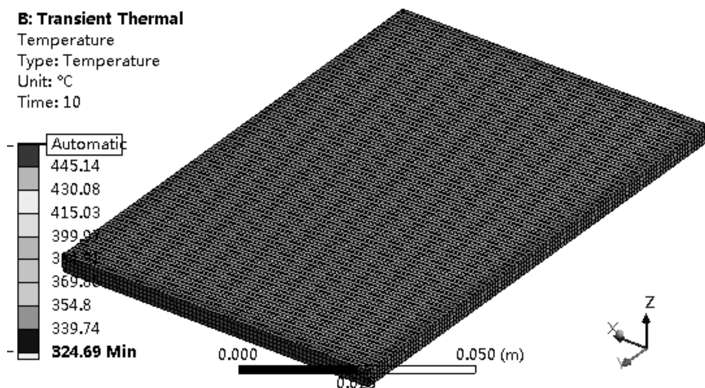


图 11–27 各时刻的温度分布图

Step12：通过云图右下角的 Tubular Table（见图 11–28）能精确地查到每个时间点上的温度变化值。

Tabular Data

	Time [s]	Temperature - Global Maximum [°C]		Time [s]	Temperature - Global Maximum [°C]		Time [s]	Temperature - Global Maximum [°C]
1	5.e-002	599.97	30	1.5	586.84	59	2.95	563.78
2	0.1	599.97	31	1.55	586.07	60	3.	562.98
3	0.15	599.94	32	1.6	585.29	61	3.05	562.17
4	0.2	599.88	33	1.65	584.52	62	3.1	561.37
5	0.25	599.8	34	1.7	583.75	63	3.15	560.57
6	0.3	599.7	35	1.75	582.97	64	3.2	559.77
7	0.35	599.57	36	1.8	582.18	65	3.25	558.97
8	0.4	599.39	37	1.85	581.4	66	3.3	558.16
9	0.45	599.16	38	1.9	580.61	67	3.35	557.36
10	0.5	598.89	39	1.95	579.81	68	3.4	556.56
11	0.55	598.57	40	2.	579.02	69	3.45	555.78
12	0.6	598.2	41	2.05	578.22	70	3.5	554.99
13	0.65	597.79	42	2.1	577.42	71	3.55	554.21
14	0.7	597.34	43	2.15	576.61	72	3.6	553.43
15	0.75	596.85	44	2.2	575.81	73	3.65	552.65
16	0.8	596.33	45	2.25	575.	74	3.7	551.86
17	0.85	595.77	46	2.3	574.19	75	3.75	551.08
18	0.9	595.19	47	2.35	573.38	76	3.8	550.3
19	0.95	594.59	48	2.4	572.57	77	3.85	549.52
20	1.	593.96	49	2.45	571.76	78	3.9	548.73
21	1.05	593.31	50	2.5	570.96	79	3.95	547.95
22	1.1	592.64	51	2.55	570.17	80	4.	547.17
23	1.15	591.96	52	2.6	569.37	81	4.05	546.38
24	1.2	591.27	53	2.65	568.57	82	4.1	545.6
25	1.25	590.56	54	2.7	567.77	83	4.15	544.82
26	1.3	589.83	55	2.75	566.98	84	4.2	544.03
27	1.35	589.1	56	2.8	566.18	85	4.25	543.25
28	1.4	588.35	57	2.85	565.38	86	4.3	542.47
29	1.45	587.6	58	2.9	564.58	87	4.35	541.68

图 11–28 不同时刻温度值

Step13：依次选择 Transient (C5)→Analysis Settings（分析设置）选项，在图 11−29 所示的 Details of “Analysis Settings”中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 10s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 200，其余默认即可。

Step14：右键依次选择 Transient（C5）→Imported Load（B6）→Imported Body Temperature 选项，在弹出的图 11−30 所示的快捷菜单中选择 Import Load 命令。

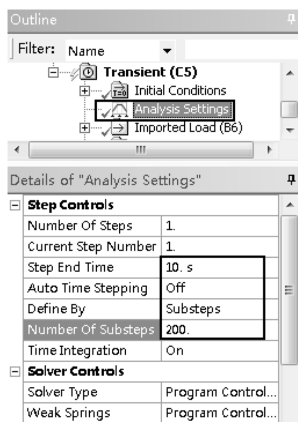


图 11−29 设置

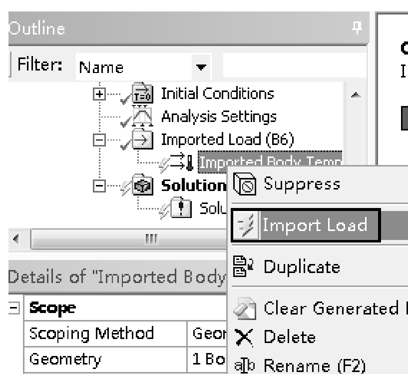


图 11−30 快捷菜单

Step15：成功导入温度分布结果后显示图 11−31 所示的云图，对比可以看出此时显示的温度分布结果是最终时刻（即 10s 时）的温度分布。

Step16：单击 Imported Body Temperature，在下面出现的图 11−32 所示的 Details of “Imported Body Temperature”面板中作如下设置：在 Source Time 栏中选择 ALL 选项，再右键依次选择 Transient（C5）→Imported Load（B6）→Imported Body Temperature 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Import Load 命令。经过一段时间的计算即可导入每一时刻的结果，如图 11−33 所示。

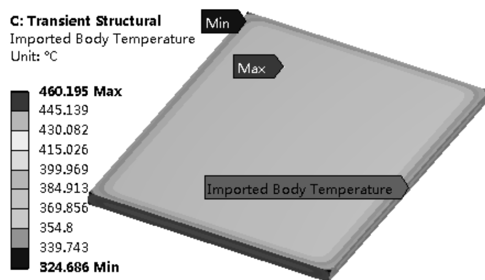


图 11−31 温度分布

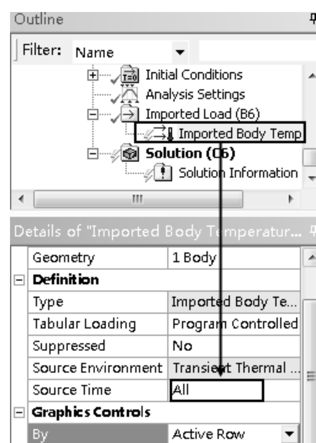


图 11−32 设置

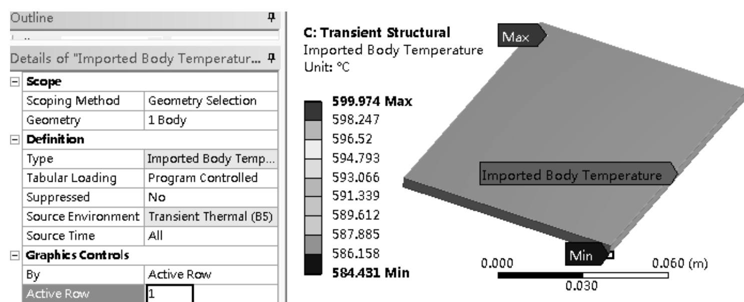


图 11-33　0.05s 温度分布

Step17：通过单击 Active Row 栏中的向右向左箭头或者输入任意一个计算范围内的数值，可以显示当前时刻的温度分布云图，如图 11-34 所示为第 5s 的温度分布。

注：经过查询可知，第 5s对应的行数为 199 行，所以在Active Row栏中输入 199。

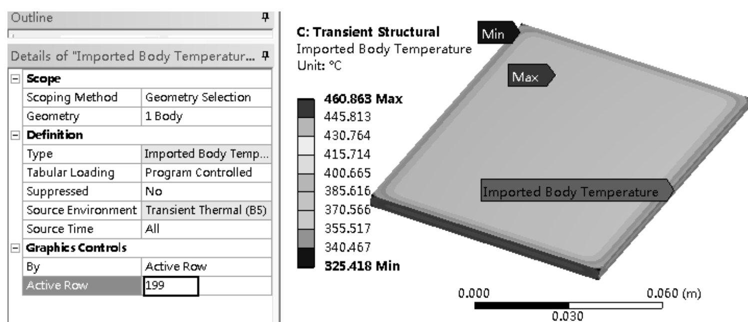


图 11-34　5s 时的温度分布

Step18：单击 Transient（C5），然后在工具栏中依次选择 Supports→Fixed Support（固定约束），如图 11-35 所示。

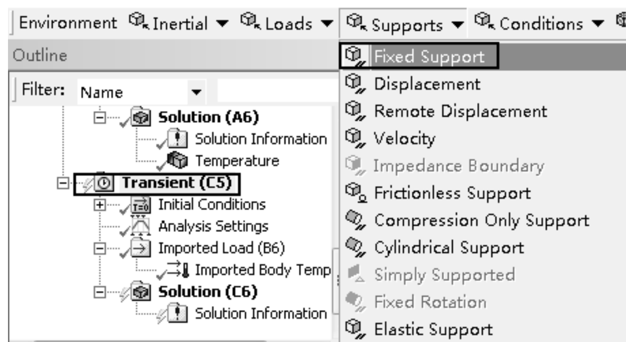


图 11-35　菜单

Step19：在下面出现的 Details of“Fixed Support”面板中作如下设置，如图 11-36 所示：在 Geometry 栏中选择平板的四个侧面，其余默认即可；选择工具栏中的 Generate 命令。

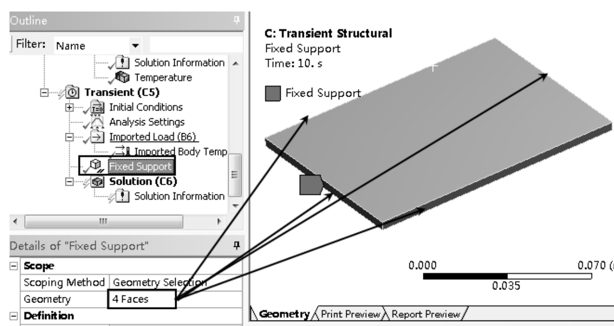


图 11-36 设置

Step20：单击 Solution（C6），在工具栏中选择 Deformation 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，经过一段时间的运算将显示图 11-37 左图所示的变形云图，此变形云图显示的是 10s 时刻的变形，图 11-37 右图给出了不同时刻与变形的关系曲线。单击曲线中的不同位置将显示出不同位置（时刻）的变形大小。

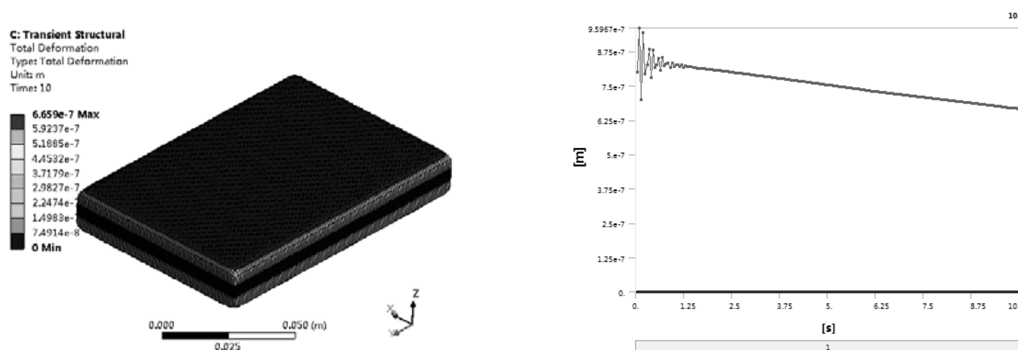


图 11-37 变形及曲线

Step21：单击 Solution（C6），在工具栏中选择 Equivalent Stress 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，经过一段时间的运算将显示图 11-38 左图所示的应力分布云图，此应力分布云图显示的是 10s 时刻的应力分布，图 11-38 右图给出了不同时刻与应力分布的关系曲线。单击曲线中的不同位置将显示出不同位置（时刻）的应力大小。

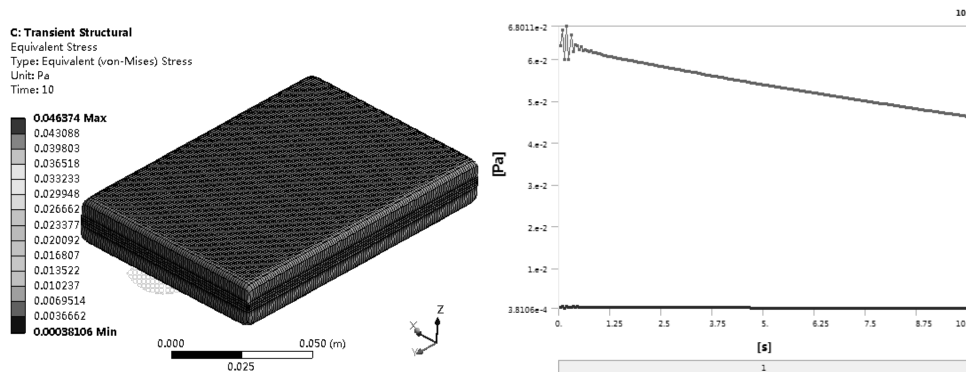


图 11-38 应力及曲线

11.3.8 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

11.4 热应力案例二——热应力对结构模态影响

模态是结构的固有特性，根据振动理论，结构的模态参数可通过下式进行求解：

$$(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}=0 \qquad (11\text{-}15)$$

式中，$\boldsymbol{K}$ 为结构总刚度矩阵，$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵，$\boldsymbol{\varphi}$ 为阵型向量。

热环境条件下，结构的模态主要受到材料参数随温度变化和热环境引起的结构内部热应力的影响。另外，对于一些特殊结构还需要考虑到几何非线性等因素的影响。当结构受到热载荷后，式（11-15）中质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的改变可忽略不计，而结构材料参数随温度增加而发生较大的变化。在考虑温度影响时，结构刚度矩阵可表示为：

$$\boldsymbol{K}_T=\int_\Omega \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{D}_T\boldsymbol{B}\mathrm{d}\Omega \qquad (11\text{-}16)$$

式中，$\boldsymbol{B}$ 为几何矩阵，$\boldsymbol{D}$ 为与材料弹性模量 E 和泊松比 μ 有关的弹性矩阵。

另一方面，温度变化产生的温度梯度导致结构内部出现热应力，需要在刚度矩阵中考虑热应力的影响，结构的热应力刚度矩阵可表示为：

$$\boldsymbol{K}_\sigma=\int_\Omega \boldsymbol{G}^T\Gamma\boldsymbol{G}\mathrm{d}\Omega \qquad (11\text{-}17)$$

式中，$\boldsymbol{G}$ 为形函数矩阵，$\boldsymbol{\Gamma}$ 为结构热应力矩阵。

在求解热环境下结构模态参数，需要综合考虑热环境引起的材料参数变化和热应力对刚度矩阵的影响。在热环境条件下，结构的总刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 为：

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_T+\boldsymbol{K}_\sigma \qquad (11\text{-}18)$$

式中 $\boldsymbol{K}_T$ 为结构刚度矩阵，$\boldsymbol{K}_\sigma$ 为热应力刚度矩阵。

式（11-18）中，结构刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_T$ 与结构的物理属性有关，温度上升时材料弹性模量下降，使总刚度矩阵呈现出减小趋势。热应力刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_\sigma$ 则与结构热应力形式有关，当热应力为拉应力时，$\boldsymbol{K}_\sigma$ 为正值，结构固有频率出现上升趋势；当热应力为压应力时，$\boldsymbol{K}_\sigma$ 为负值，结构固有频率出现下降趋势。由于前者与结构刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_T$ 对固有频率的影响趋势刚好相反，因此在热环境中，由热拉应力产生的附加热应力刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_\sigma$ 是否在总刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的变化过程中占主导作用，将直接影响固有频率的变化趋势。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中升温时模态分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter11\char11-2\TEMP_RISE_MODAL.wbpj

11.4.1 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1: 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2: 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项右键单击 A6 创建一个 Transient Thermal（瞬态热分析），即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目，如图 11-39 所示。

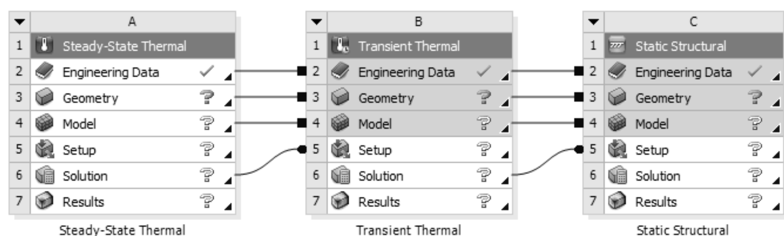


图 11-39　创建分析项目

11.4.2 创建几何体模型

Step1: 在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 11-40 所示。

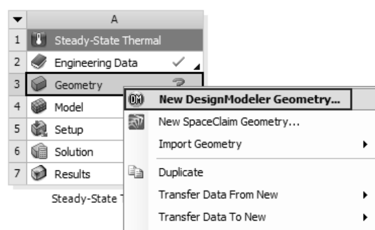


图 11-40　导入几何体

Step2: 在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，依次选择菜单，在坐标原点创建一个矩形，并将矩形的两条边分别设置为 50mm 和 500mm，如图 11-41 所示。

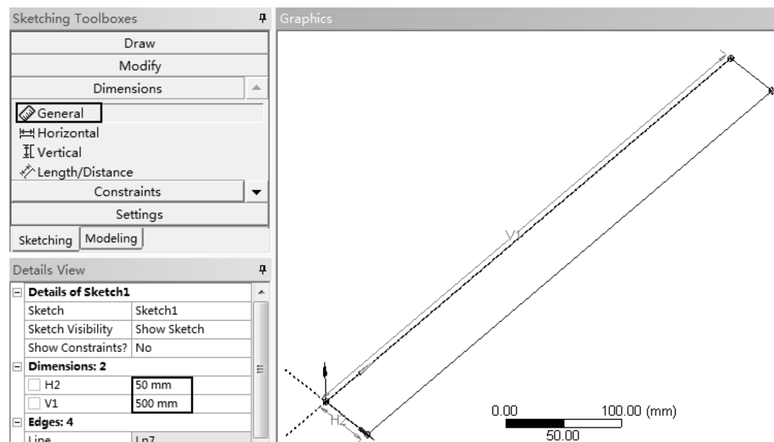


图 11-41　草绘

Step3：选择工具栏中的 Extrude 命令，在弹出图 11-42 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选择刚才建立的草绘 Sketch1；在 FD1,Depth（>0）栏中输入厚度为 10mm，其余默认即可，并选择工具栏中的 Generate 命令生成几何实体。

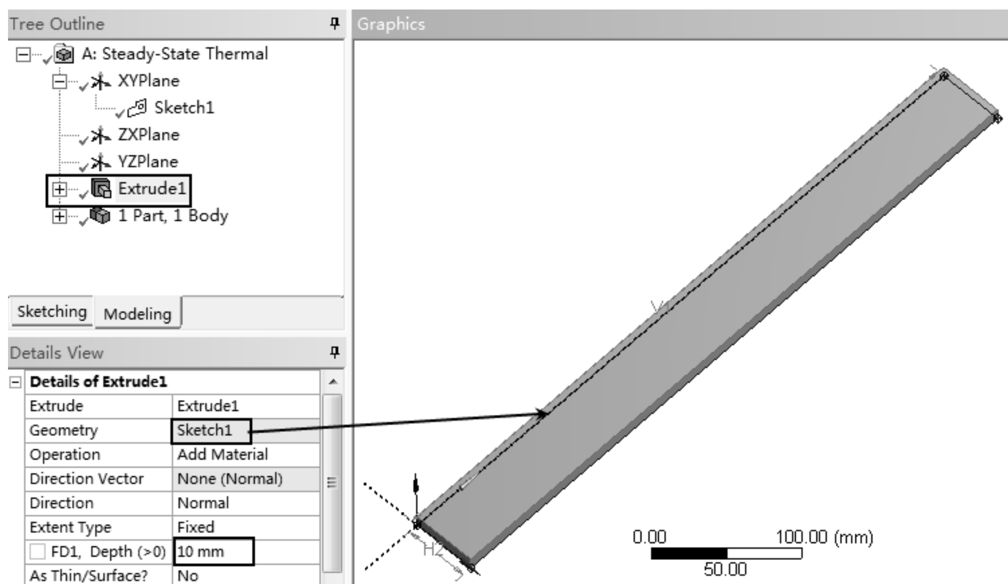


图 11-42　几何实体

Step4：单击工具栏中的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 TEMP_RISE_MODAL.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

11.4.3 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 进入 Mechanical 热分析的材料设置界面。

在 Outline of Schematic A2，B2，C2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时在 Properties of Outline Row 4：mat 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 的数值为 9；Specific Heat 的数值为 520，Coefficient of Thermal Expansion 的数值为 1E-05，Young's Modulus 的数值为 1.05E+11，Poisson's Ratio 的数值为 0.39，Density 为 4450，如图 11-43 所示。

Step2：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 11-44 所示 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data

	A	B	D
1	Contents of Engineering Data		Description
3	Structural Steel		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	mat		

Properties of Outline Row 4: mat

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	4450	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	50	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	1.05E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.39			
10	Bulk Modulus	1.5909E+11	Pa		
11	Shear Modulus	3.777E+10	Pa		
12	Field Variables				
13	Temperature	Yes			
14	Shear Angle	No			
15	Degradation Factor	No			
16	Isotropic Thermal Conductivity	9	W m^-1...		
17	Specific Heat	520	J kg^-1 ...		

图 11-43　设置材料物理属性

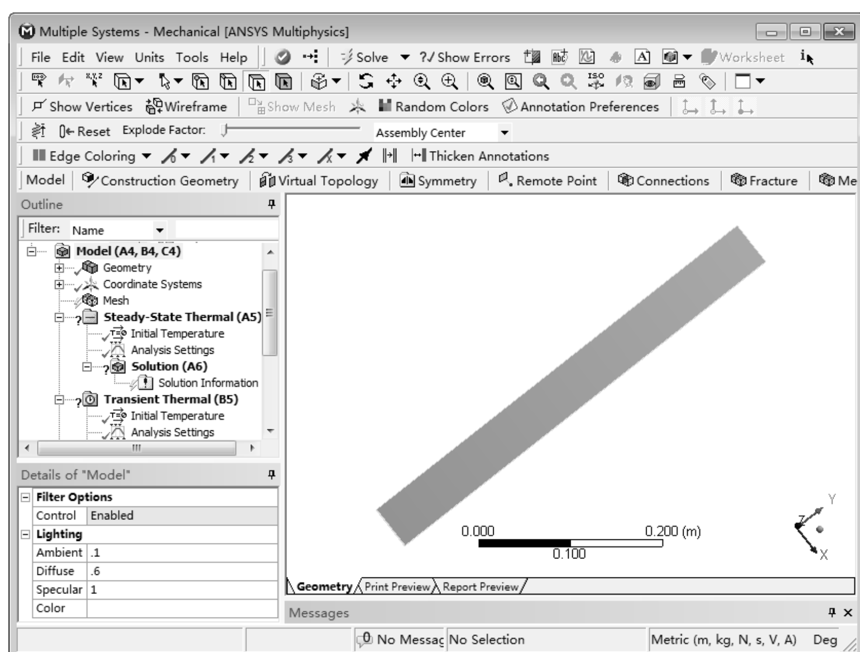


图 11-44　Mechanical 界面



Step3：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中，选择 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 11−45 所示。

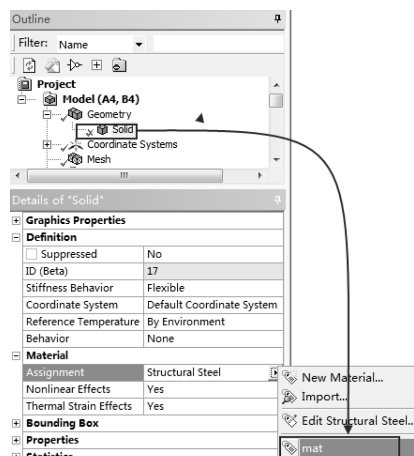


图 11−45　修改材料属性

Step4：在参数列表的 Material 中，单击 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

11.4.4 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置面板的 Element Size 栏中输入 2.e-003m，如图 11−46 所示。

Step2：右键单击 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 11−47 所示。

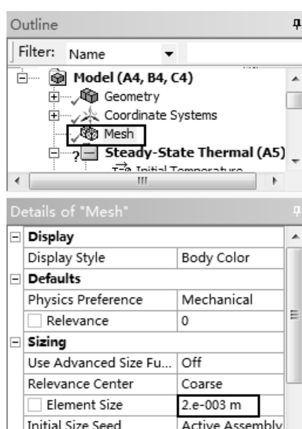


图 11−46　网格设置

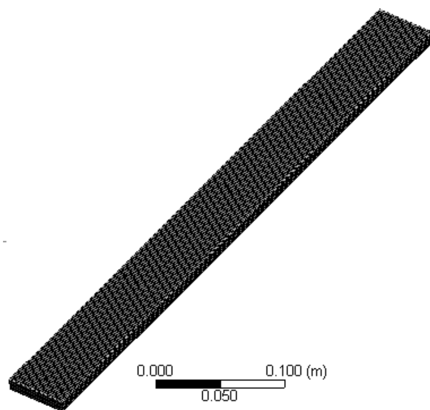


图 11−47　网格效果

11.4.5 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选

项，此时出现图 11-48 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 11-49 所示。

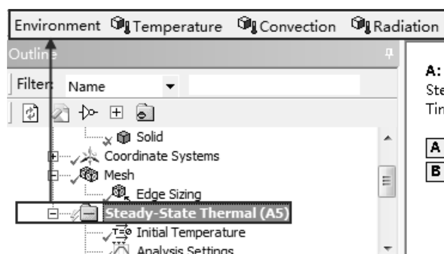


图 11-48 Environment 工具栏

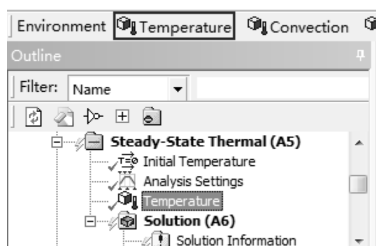


图 11-49 添加载荷

Step3：如图 11-50 所示，选中 Temperature，在 Details of “Temperature” 中作如下操作：在 Geometry 中选择选择球体；在 Definition→Magnitude 栏中输入 50；其余默认即可，完成一个温度的添加。

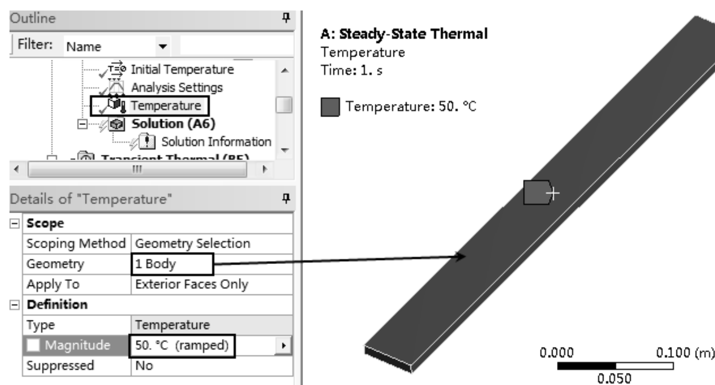


图 11-50 温度

Step4：右键单击 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-51 所示。

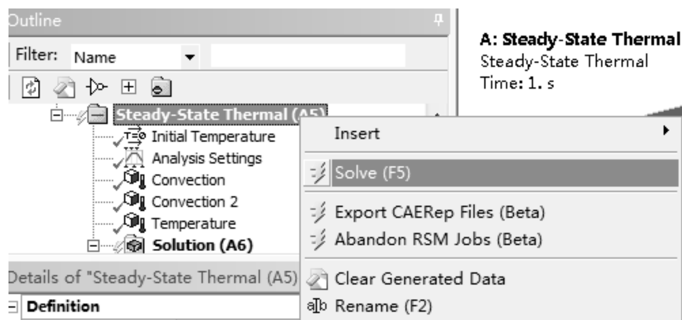


图 11-51 求解

11.4.6 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 11−52 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 11−53 所示，此时在分析树中出现 Temperature（温度）选项。

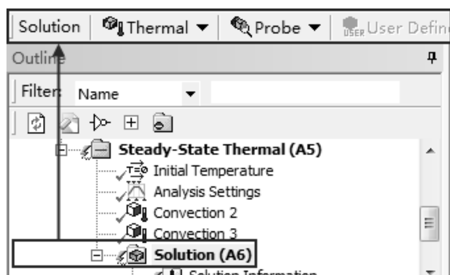


图 11−52　Solution 工具栏

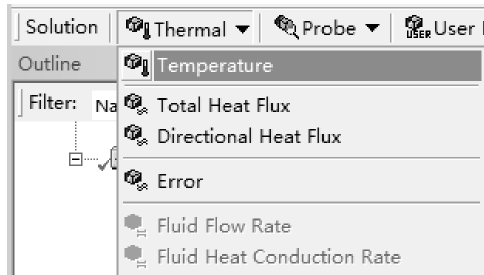


图 11−53　添加温度选项

Step3：右键单击 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11−54 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 11−55 所示。

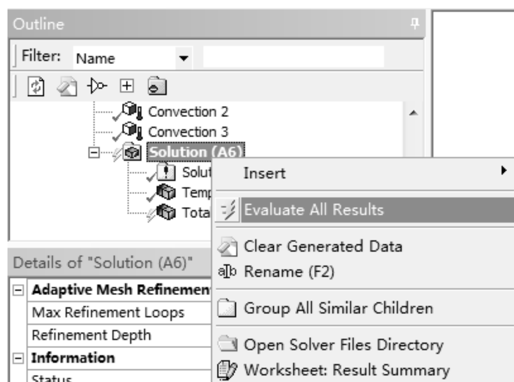


图 11−54　快捷菜单

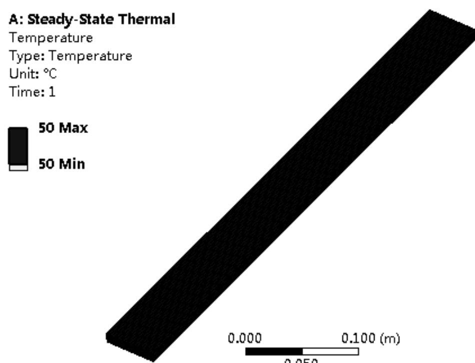


图 11−55　温度分布

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在出现的 Environment 工具栏中单击两次 Convection 选项。

Step6：单击 Convection 选项，然后在 Details of “Convection”面板中作如下设置，如图 11−56 所示：在 Geometry 栏中确定上下两个表面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 180；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 100℃，其余默认即可。

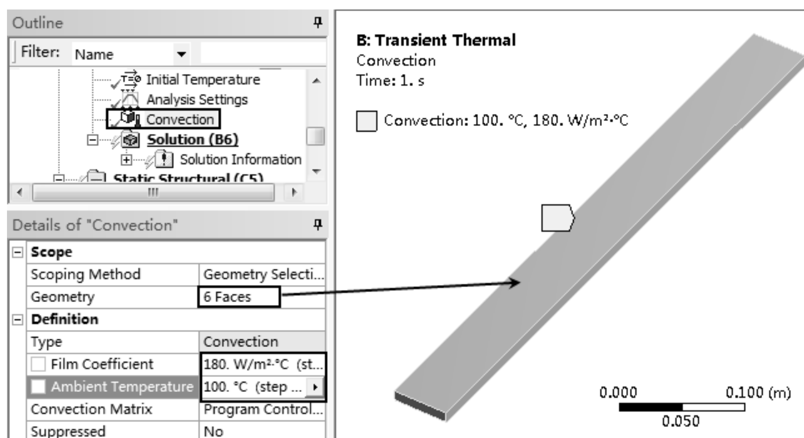


图 11-56　对流

Step7：设置分析选项。单击 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在如图 11-57 所示的 Detaila of“Analysis Settings”面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 100s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 200，其余默认即可。

Step8：右键单击 Outlines（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-58 所示。

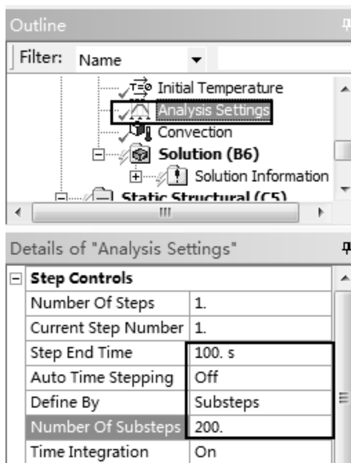


图 11-57　设置



图 11-58　求解

Step9：单击 Solution → Solution Information → Temperature-Global Maximum 和 Temperature-Global Minimum，将显示图 11-59 所示的升温曲线图，从图中可以看出在第 100s，板的最高温度升到了 87.901℃，最低温度升到了 85.521℃。

Step10：添加一个 Temperature 后处理命令，通过后处理可以看到图 11-60 所示的各个时刻的温度值，可以看出时间为 100s 时的温度为 87.901℃。



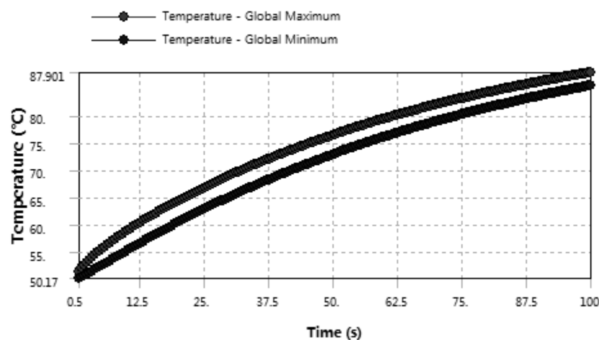


图 11-59　曲线图

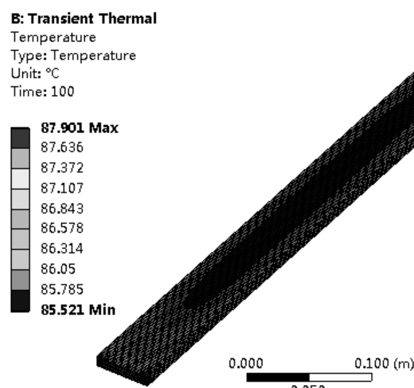


图 11-60　100s 时的温度分布图

Step11：通过云图右下角的 Tubular Table（见图 11-61），能精确地查到每个时间点上的温度变化值。

Tabular Data

	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]		Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]		Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	0.5	50.17	51.334	33	16.5	58.761	62.68	66	33.	66.461	70.346
2	1.	50.408	52.04	34	17.	59.018	62.945	67	33.5	66.671	70.549
3	1.5	50.664	52.609	35	17.5	59.273	63.207	68	34.	66.879	70.75
4	2.	50.926	53.115	36	18.	59.527	63.468	69	34.5	67.086	70.949
5	2.5	51.19	53.583	37	18.5	59.779	63.726	70	35.	67.292	71.147
6	3.	51.456	54.024	38	19.	60.03	63.981	71	35.5	67.496	71.344
7	3.5	51.724	54.444	39	19.5	60.279	64.235	72	36.	67.699	71.539
8	4.	51.994	54.847	40	20.	60.527	64.486	73	36.5	67.901	71.732
9	4.5	52.266	55.237	41	20.5	60.773	64.735	74	37.	68.102	71.925
10	5.	52.539	55.615	42	21.	61.018	64.982	75	37.5	68.301	72.116
11	5.5	52.814	55.982	43	21.5	61.262	65.227	76	38.	68.499	72.305
12	6.	53.09	56.341	44	22.	61.503	65.469	77	38.5	68.696	72.493
13	6.5	53.366	56.691	45	22.5	61.744	65.71	78	39.	68.891	72.68
14	7.	53.643	57.034	46	23.	61.983	65.949	79	39.5	69.086	72.865
15	7.5	53.919	57.37	47	23.5	62.22	66.186	80	40.	69.279	73.049
16	8.	54.196	57.7	48	24.	62.456	66.421	81	40.5	69.471	73.231
17	8.5	54.472	58.025	49	24.5	62.69	66.654	82	41.	69.662	73.413
18	9.	54.748	58.345	50	25.	62.923	66.885	83	41.5	69.851	73.593
19	9.5	55.023	58.659	51	25.5	63.155	67.114	84	42.	70.04	73.771
20	10.	55.298	58.97	52	26.	63.385	67.341	85	42.5	70.227	73.949
21	10.5	55.572	59.275	53	26.5	63.614	67.567	86	43.	70.413	74.125
22	11.	55.844	59.577	54	27.	63.841	67.791	87	43.5	70.598	74.299
23	11.5	56.116	59.875	55	27.5	64.067	68.013	88	44.	70.782	74.473
24	12.	56.386	60.17	56	28.	64.292	68.233	89	44.5	70.964	74.645
25	12.5	56.656	60.461	57	28.5	64.515	68.452	90	45.	71.146	74.816
26	13.	56.924	60.749	58	29.	64.737	68.669	91	45.5	71.326	74.986
27	13.5	57.19	61.033	59	29.5	64.957	68.884	92	46.	71.505	75.155
28	14.	57.456	61.315	60	30.	65.176	69.098	93	46.5	71.683	75.322
29	14.5	57.72	61.593	61	30.5	65.393	69.31	94	47.	71.86	75.488
30	15.	57.982	61.869	62	31.	65.61	69.52	95	47.5	72.036	75.653
31	15.5	58.243	62.142	63	31.5	65.825	69.729	96	48.	72.211	75.817
32	16.	58.503	62.412	64	32.	66.038	69.936	97	48.5	72.384	75.98

图 11-61　不同时刻温度图标

Step12：依次选择 Static Structural（C5）→Analysis Settings（分析设置）选项，在图 11-62 所示的 Details of“Analysis Settings”中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 100s，其余默认即可。

Step13：右键依次选择 Static Structural（C5）→Imported Load（B6）→Imported Body Temperature 选项，在弹出图 11-63 所示的快捷菜单中选择 Import Load 命令。

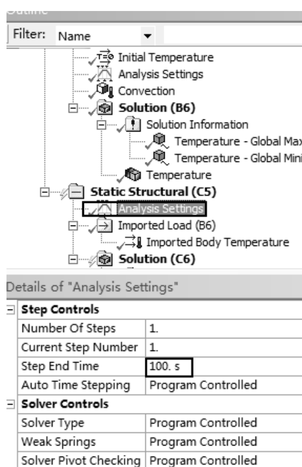


图 11-62 设置

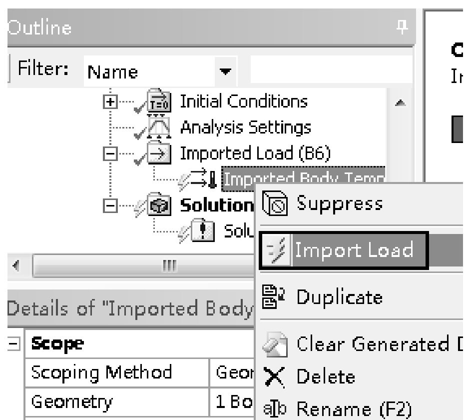


图 11-63 快捷菜单

Step14：成功导入温度分布结果后显示图 11-64 所示的云图，对比可以看出此时显示的温度分布结果是最终时刻（即 100s 时）的温度分布。

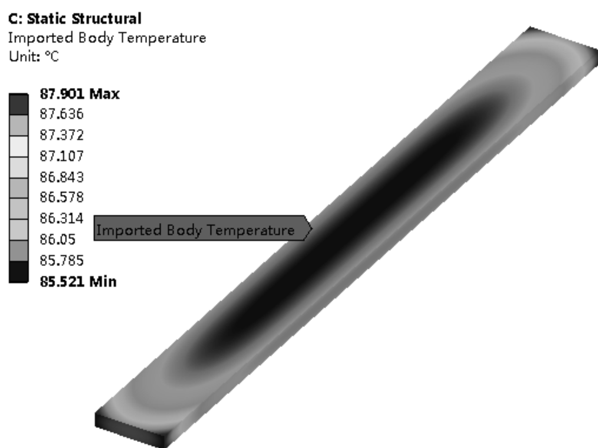


图 11-64 温度分布

Step15：单击 Static Structural（C5），然后在工具栏中依次选择 Supports→Fixed Support（固定约束），如图 11-65 所示。

Step16：在下面出现的 Details of“Fixed Support”面板中作如下设置，如图 11-66 所示：在 Geometry 栏中选择平板的两底面，其余默认即可；选择工具栏中的 Generate 命令。



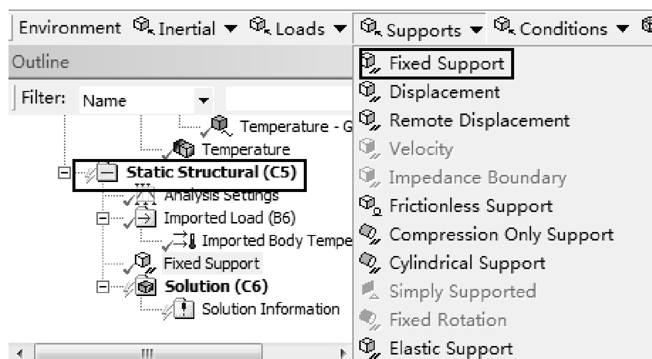


图 11-65 菜单

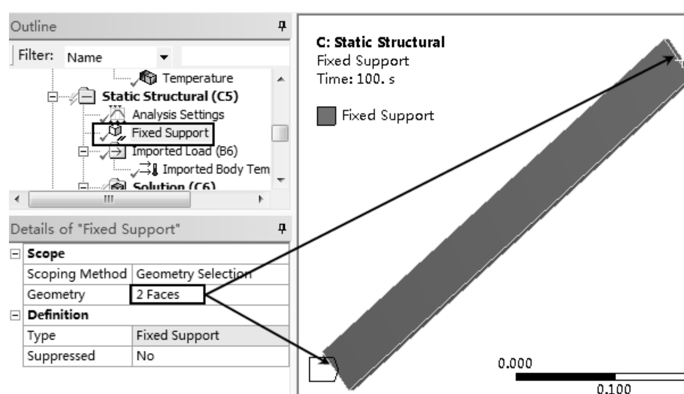


图 11-66 设置

Step17：单击 Solution（C6），在工具栏中选择 Deformation 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，此时经过一段时间的运算将显示图 11-67 所示的变形云图，此变形云图显示的是第 100s 时的变形。

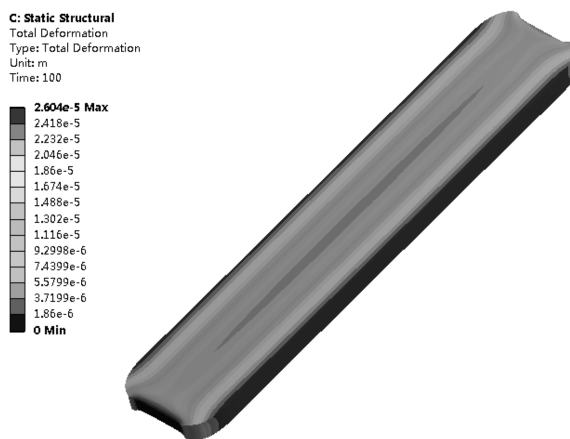


图 11-67 变形云图

Step18：单击 Solution（C6），在工具栏中选择 Equivalent Stress 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，此时经过一段时间的运算将显示图 11−68 所示的应力分布云图，此应力分布云图显示的是第 100s 时的应力分布。



图 11−68　应力分布云图

Step19：返回到 Workbench 平台，选择 Toolbox 栏中的 Modal 并将其拖曳到 C6 栏中，此时将建立一个模态分析流程图，如图 11−69 所示。

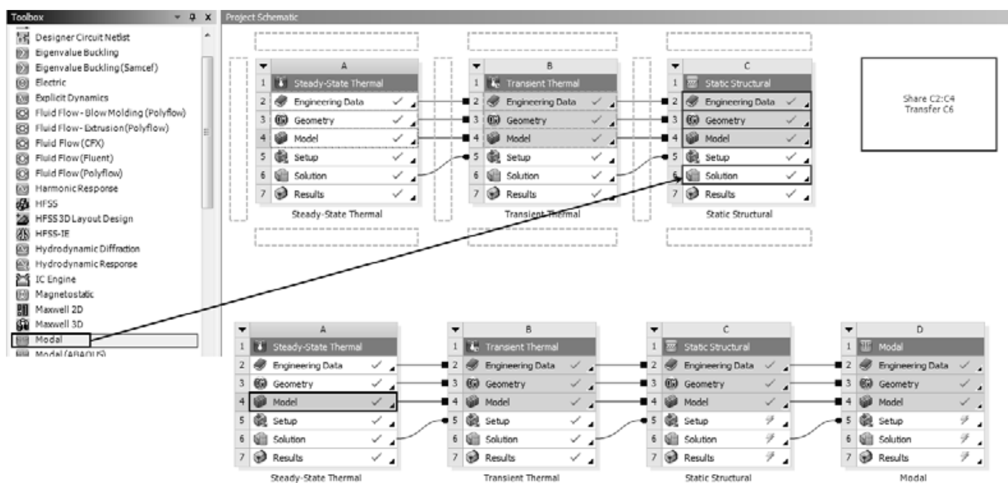


图 11−69　流程图

Step20：返回到 Mechanical 分析平台中，读者会发现此时在 Static Structural（C5）分析下面多了一个 Modal（D5）分析流程。

Step21：右键单击 Solution（C6），在弹出的快捷菜单中选择 Solve 执行计算。

Step22：右键单击 Modal（D5），在弹出的快捷菜单中选择 Solve 执行计算。

Step23：计算完成后，查看前六阶变形云图与自振频率图如图 11−70～图 11−72 所示。

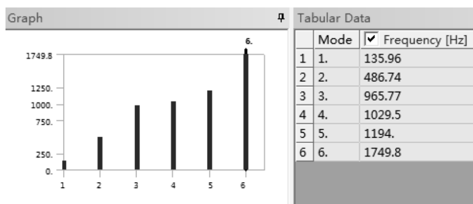


图 11-70　各阶频率

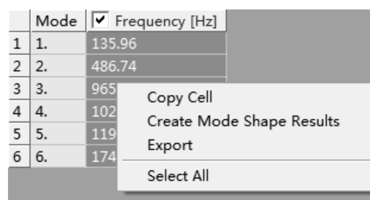


图 11-71　选择各阶频率

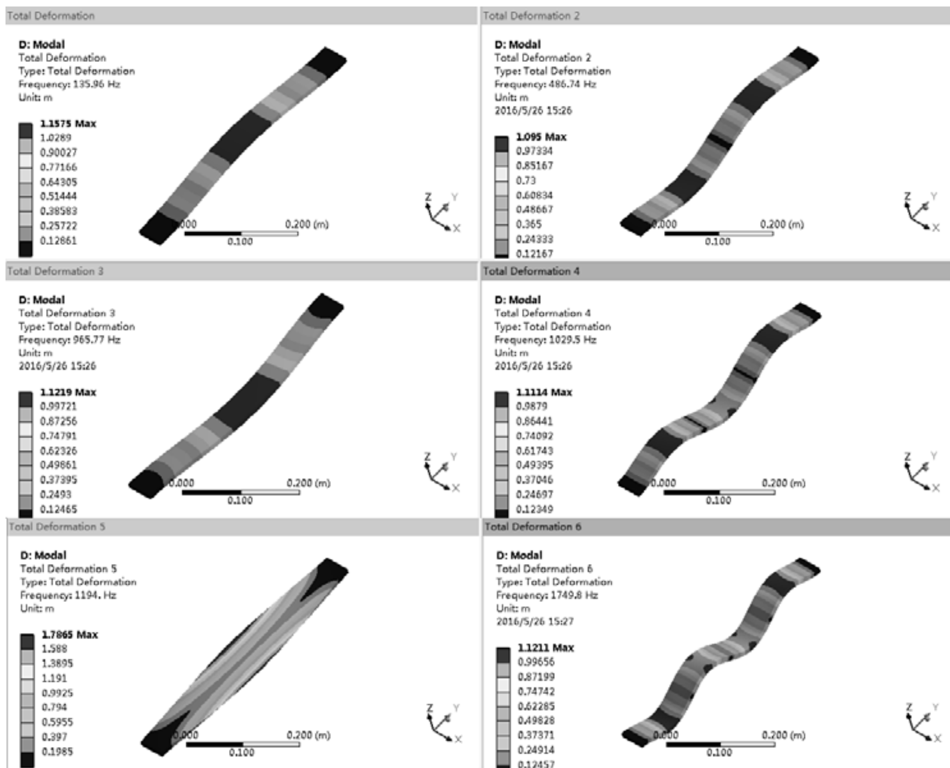


图 11-72　前六阶变形

至此，ANSYS Workbench 中升温时模态分析的建模及求解的有关内容就为大家讲解完了，接下来（11.4.7～11.4.12 小节）为大家讲解 ANSYS Workbench 中降温时模态分析的建模及求解方法。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中降温时模态分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter11\char11-2\TEMP_FALL_MODAL.wbpj

11.4.7　启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳

态热分析）选项右键，单击 A6 栏创建一个 Transient Thermal（瞬态热分析），即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目，如图 11−73 所示。

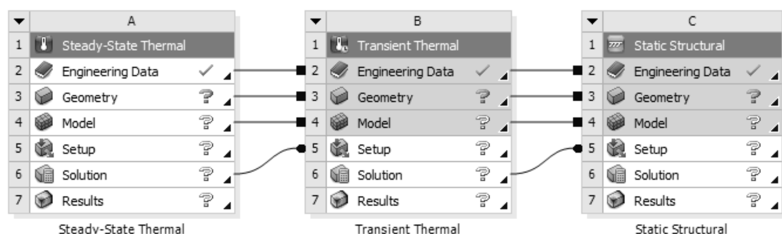


图 11−73　创建分析项目

11.4.8 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesignModeler Geometry 命令，如图 11−74 所示。

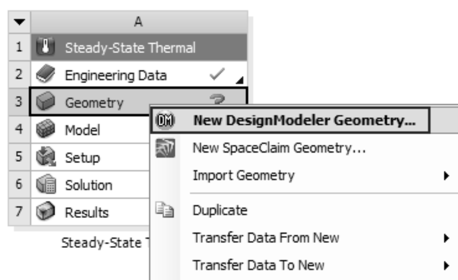


图 11−74　导入几何体

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，依次选择菜单，在坐标原点创建一个矩形，并将矩形的两条边分别设置为 50mm 和 500mm，如图 11−75 所示。

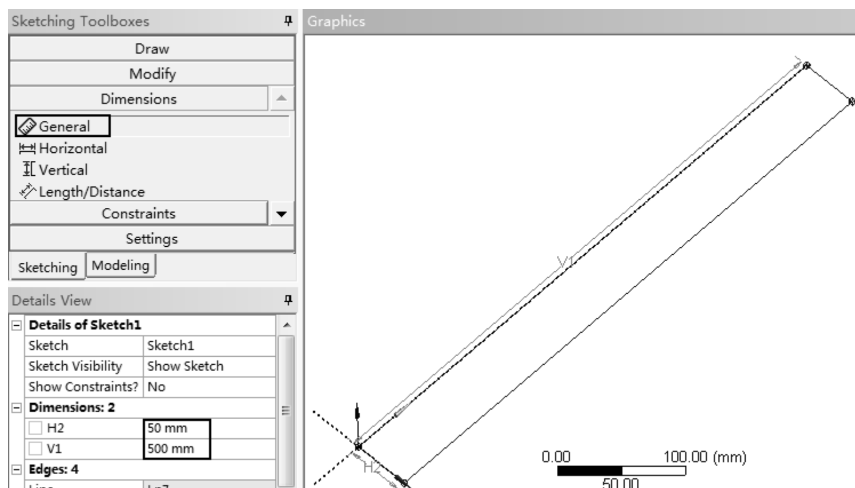


图 11−75　草绘

Step3：选择工具栏中的 Extrude 命令，在弹出的图 11-76 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选择刚才建立的草绘 Sketch1；在 FD1, Depth (>0) 栏中输入厚度为 10mm，其余默认即可，并选择工具栏中的 Generate 命令生成几何实体。

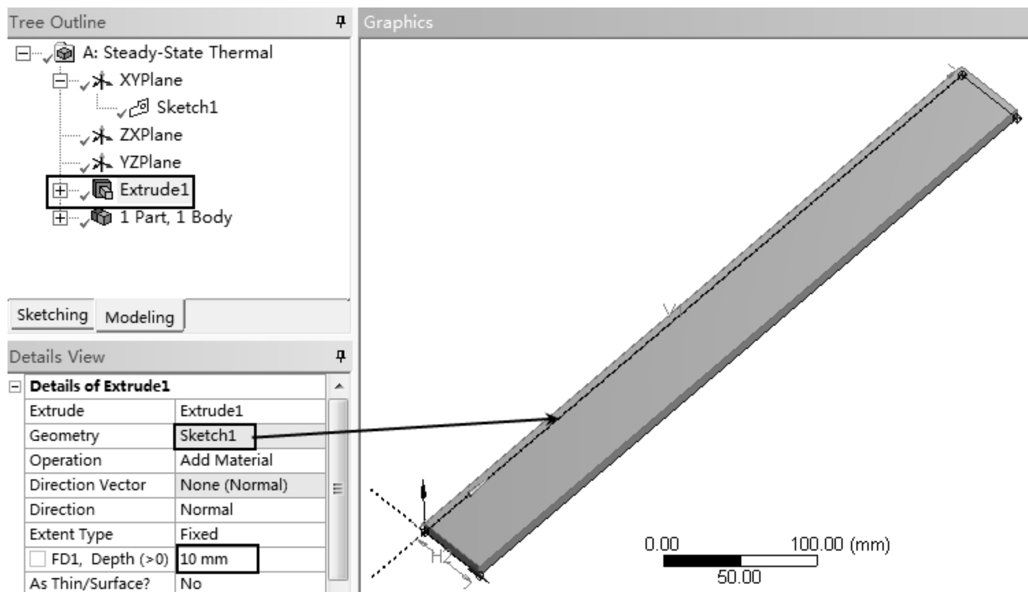


图 11-76　几何实体

Step4：单击工具栏中的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 TEMP_FALL_MODAL.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

11.4.9 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 项进入 Mechanical 热分析的材料设置界面。

Step2：在 Outline of Schematic A2，B2，C2：Engineering Data 栏中的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧 Toolbox 栏中的 Thermal 下选择 Isotropic Thermal Conductivity（各向同性导热系数）并直接拖曳到 mat 中，此时 Properties of Outline Row 4：mat 下面的 Isotropic Thermal Conductivity 的数值为 9，Specific Heat 的数值为 520，Coefficient of Thermal Expansion 的数值为 1E-05，Isotropic Elasticity 的数值为 1.05E+11，Poisson’s Ratio 的数值为 0.39，Density 为 4450，如图 11-77 所示。

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 11-78 所示 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data

	A	B	D
1	Contents of Engineering Data		Description
3	Structural Steel		from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	mat		

Properties of Outline Row 4: mat

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	4450	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	50	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's ...			
8	Young's Modulus	1.05E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.39			
10	Bulk Modulus	1.5909E+11	Pa		
11	Shear Modulus	3.777E+10	Pa		
12	Field Variables				
13	Temperature	Yes			
14	Shear Angle	No			
15	Degradation Factor	No			
16	Isotropic Thermal Conductivity	9	W m^-1...		
17	Specific Heat	520	J kg^-1 ...		

图 11−77　设置材料物理属性

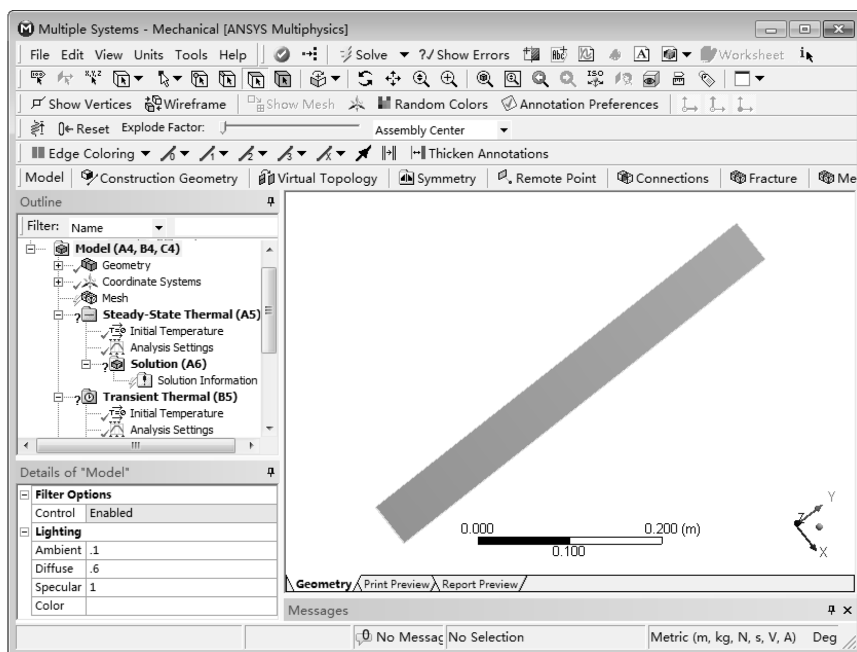


图 11−78　Mechanical 界面

Step4：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中选择 Geometry 选项下的 Solid，此

时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 11−79 所示。

Step5：在参数列表的 Material 下，单击 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

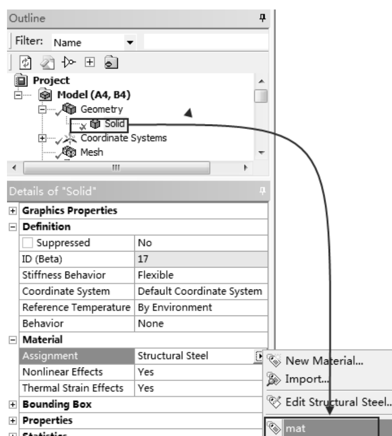


图 11−79　修改材料属性

11.4.10 划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置窗口的 Element Size 栏中输入 2.e−003m，如图 11−80 所示。

Step2：右键单击 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 11−81 所示。

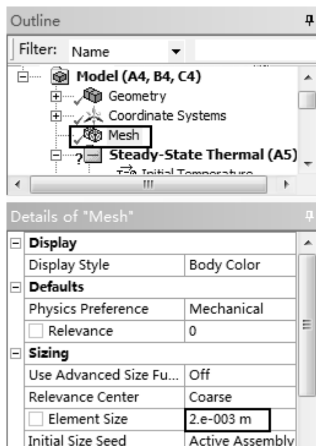


图 11−80　网格设置

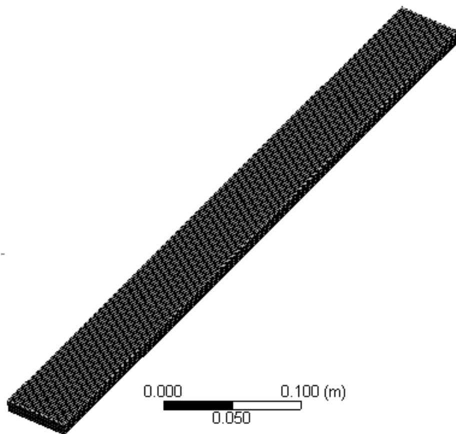


图 11−81　网格效果

11.4.11 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 11−82 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 11−83 所示。

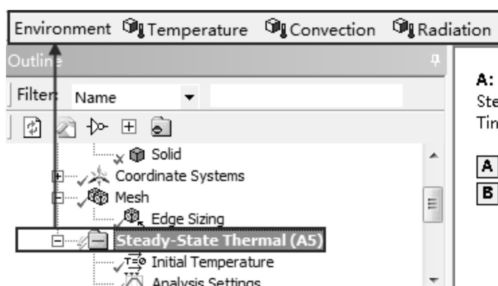


图 11−82　Environment 工具栏

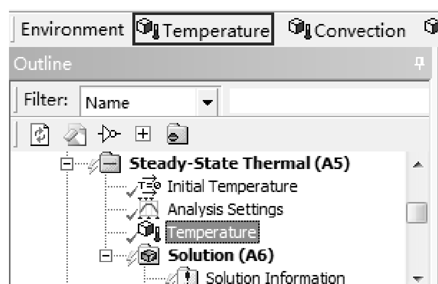


图 11−83　添加载荷

Step3：如图 11−84 所示，选中 Temperature，在 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择球体；在 Definition→Magnitude 栏中输入 50；其余默认即可，完成一个温度的添加。

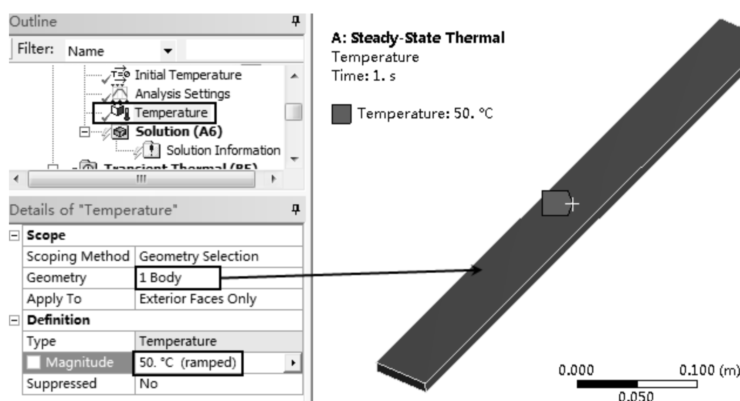


图 11−84　温度

Step4：右键单击 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11−85 所示。

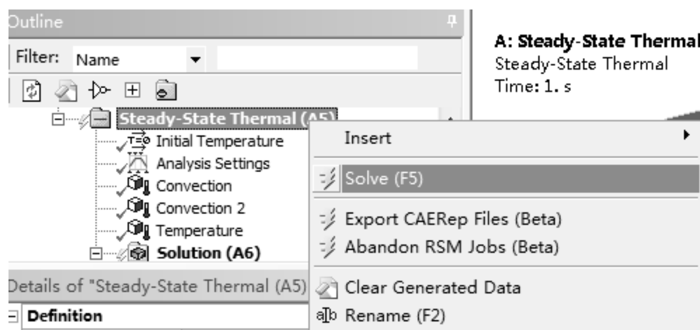


图 11−85　求解



11.4.12 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 11-86 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 11-87 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

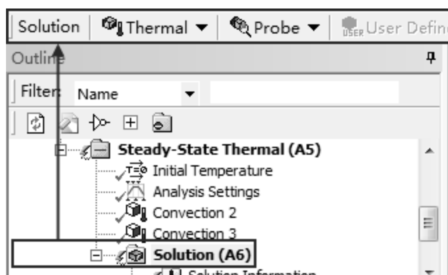


图 11-86 Solution 工具栏

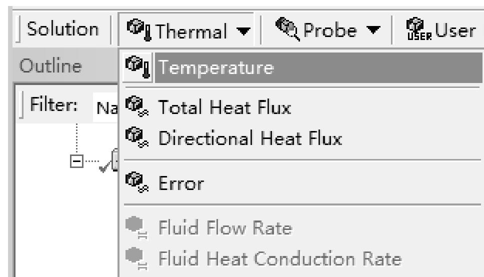


图 11-87 添加温度选项

Step3：右键单击 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项，在弹出的快捷菜单中选择Evaluate All Results 命令，如图 11-88 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Temperature（温度），如图 11-89 所示。

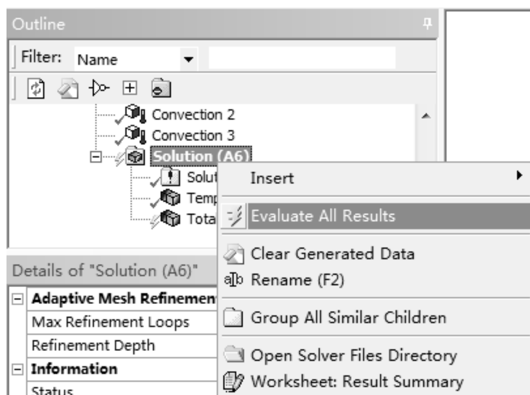


图 11-88 快捷菜单

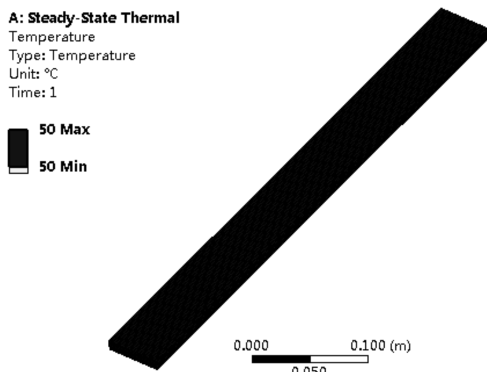


图 11-89 温度分布

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在出现的 Environment 工具栏中单击两次 Convection 选项。

Step6：单击 Convection 选项，然后在 Details of “Convection”面板中作如下设置，如图 11-90 所示：在 Geometry 栏中确定上下两个表面被选中；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 180；在 Ambient Temperature 栏中输入此时的环境温度为 0℃，其余默认即可。

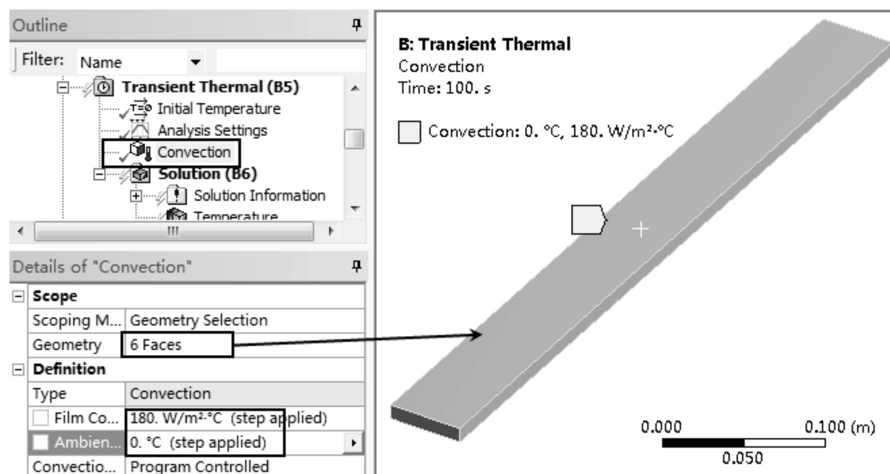


图 11-90 对流

Step7：设置分析选项。单击 Transient Thermal（B5）下面的 Analysis Settings（分析设置），在下面出现图 11-91 所示的 Details of“Analysis Settings”分析选项设置面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 100s；在 Auto Time Stepping 栏中选择 Off；在 Define By 栏中选择 Substeps；在 Number Of Substeps 栏中输入 200，其余默认即可。

Step8：右键单击 Outlines（分析树）中的 Transient Thermal（B5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-92 所示。

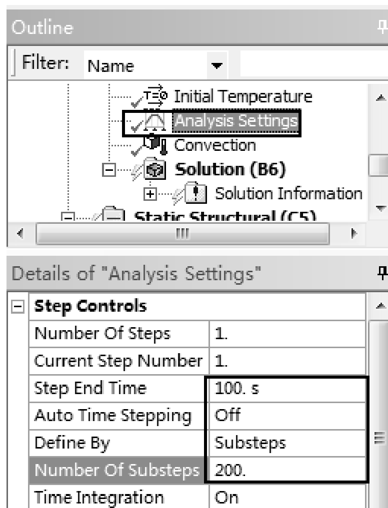


图 11-91 设置

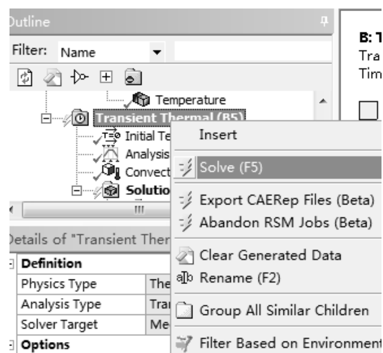


图 11-92 求解

Step9：单击 Solution→Solution Information→Temperature-Global Maximum 和 Temperature-Global Minimum，将显示图 11-93 所示的降温曲线图，从图中可以看出 100s 的时间内，板的最高温度降到了 14.479℃，最低温度降到了 12.1℃。

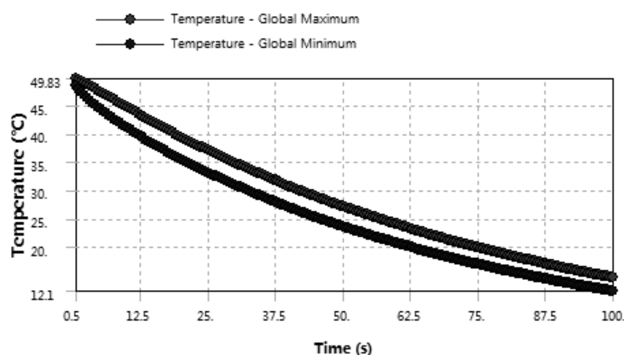


图 11–93　降温曲线图

Step10：添加一个 Temperature 后处理命令，通过后处理可以看到图 11–94 所示的各个时刻的温度值，可以看出时间为 100s 时的温度为 14.479℃。

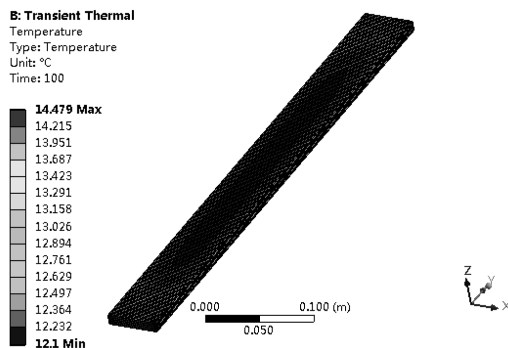


图 11–94　100s 时的温度分布图

Step11：通过云图右下角的 Tubular Table（见图 11–95），能精确地查到每个时间点上的温度变化值。

	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]		Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]		Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	0.5	48.666	49.83								
2	1.	47.96	49.592	33	16.5	37.32	41.239	65	32.5	29.858	33.75
3	1.5	47.391	49.336	34	17.	37.055	40.982	66	33.	29.654	33.539
4	2.	46.885	49.074	35	17.5	36.793	40.727	67	33.5	29.451	33.329
5	2.5	46.417	48.81	36	18.	36.532	40.473	68	34.	29.25	33.121
6	3.	45.976	48.544	37	18.5	36.274	40.221	69	34.5	29.051	32.914
7	3.5	45.556	48.276	38	19.	36.019	39.97	70	35.	28.853	32.708
8	4.	45.153	48.006	39	19.5	35.765	39.721	71	35.5	28.656	32.504
9	4.5	44.763	47.734	40	20.	35.514	39.473	72	36.	28.461	32.301
10	5.	44.385	47.461	41	20.5	35.265	39.227	73	36.5	28.268	32.099
11	5.5	44.018	47.186	42	21.	35.018	38.982	74	37.	28.075	31.898
12	6.	43.659	46.91	43	21.5	34.773	38.738	75	37.5	27.884	31.699
13	6.5	43.309	46.634	44	22.	34.531	38.497	76	38.	27.695	31.501
14	7.	42.966	46.357	45	22.5	34.29	38.256	77	38.5	27.507	31.304
15	7.5	42.63	46.081	46	23.	34.051	38.017	78	39.	27.32	31.109
16	8.	42.3	45.804	47	23.5	33.814	37.78	79	39.5	27.135	30.914
17	8.5	41.975	45.528	48	24.	33.579	37.544	80	40.	26.951	30.721
18	9.	41.655	45.252	49	24.5	33.346	37.31	81	40.5	26.769	30.529
19	9.5	41.341	44.977	50	25.	33.115	37.077	82	41.	26.587	30.338
20	10.	41.03	44.702	51	25.5	32.886	36.845	83	41.5	26.407	30.149
21	10.5	40.725	44.428	52	26.	32.659	36.615	84	42.	26.229	29.96
22	11.	40.423	44.156	53	26.5	32.433	36.386	85	42.5	26.051	29.773
23	11.5	40.125	43.884	54	27.	32.209	36.159	86	43.	25.875	29.587
24	12.	39.83	43.614	55	27.5	31.987	35.933	87	43.5	25.701	29.402
25	12.5	39.539	43.344	56	28.	31.767	35.708	88	44.	25.527	29.218
26	13.	39.251	43.076	57	28.5	31.548	35.485	89	44.5	25.355	29.036
27	13.5	38.967	42.81	58	29.	31.331	35.263	90	45.	25.184	28.854
28	14.	38.685	42.544	59	29.5	31.116	35.043	91	45.5	25.014	28.674
29	14.5	38.407	42.28	60	30.	30.902	34.824	92	46.	24.845	28.495
30	15.	38.131	42.018	61	30.5	30.69	34.607	93	46.5	24.678	28.317
31	15.5	37.858	41.757	62	31.	30.48	34.39	94	47.	24.512	28.14
32	16.	37.588	41.497	63	31.5	30.271	34.175	95	47.5	24.347	27.964

图 11–95　不同时刻温度图标

Step12：依次选择 Static Structural (C5)→Analysis Settings（分析设置）选项，在下面出现图 11−96 所示的 Details of“Analysis Settings”中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入 100s，其余默认即可。

Step13：右键依次选择 Static Structural（C5）→Imported Load（B6）→Imported Body Temperature 选项，在弹出的图 11−97 所示的快捷菜单中选择 Import Load 命令。

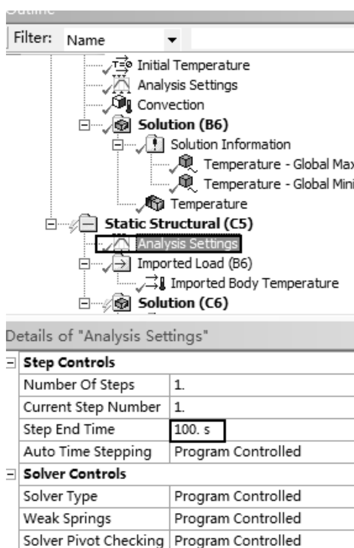


图 11−96 设置

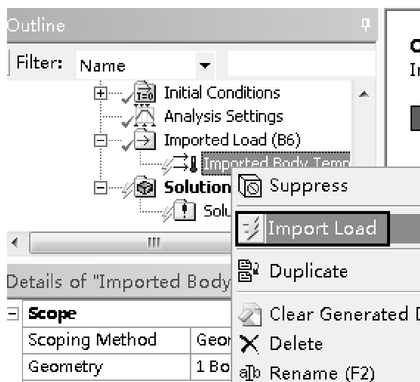


图 11−97 快捷菜单

Step14：成功导入温度分布结果后显示图 11−98 所示的云图，对比可以看出此时显示的温度分布结果是最终时刻（即 100s 时）的温度分布。

Step15：单击 Static Structural（C5），然后在工具栏中依次选择 Supports→Fixed Support（固定约束），如图 11−99 所示。

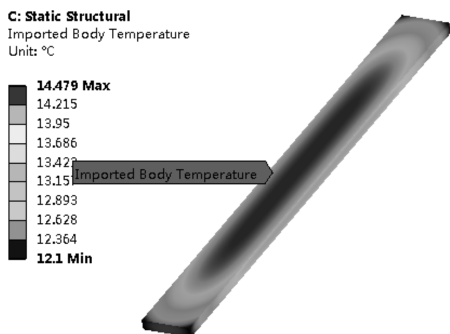


图 11−98 温度分布云图

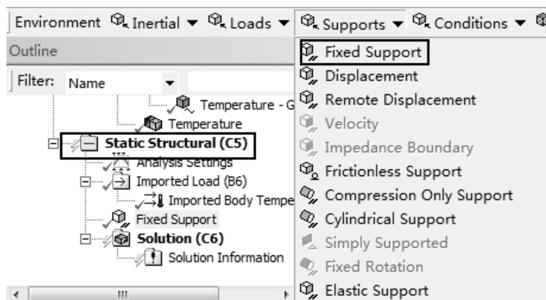


图 11−99 菜单

Step16：在下面出现的 Details of“Fixed Support”面板中作如下设置，如图 11−100 所示：在 Geometry 栏中选择平板的两底面，其余默认即可；选择工具栏中的 Generate 命令。



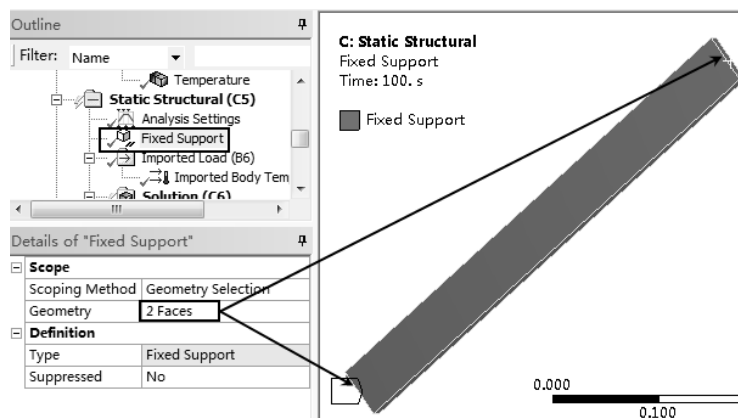


图 11-100　设置

Step17：单击 Solution（C6），在工具栏中选择 Deformation 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，此时经过一段时间的运算将显示图 11-101 所示的变形云图，此变形云图显示的是 100s 时刻的变形。

Step18：单击 Solution（C6），在工具栏中选择 Equivalent Stress 选项，并单击工具栏中的 Generate 命令，此时经过一段时间的运算将显示图 11-102 所示的应力分布云图，此应力分布云图显示的是 100s 时刻的应力分布。

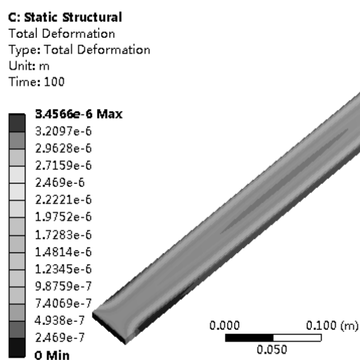


图 11-101　变形分布云图

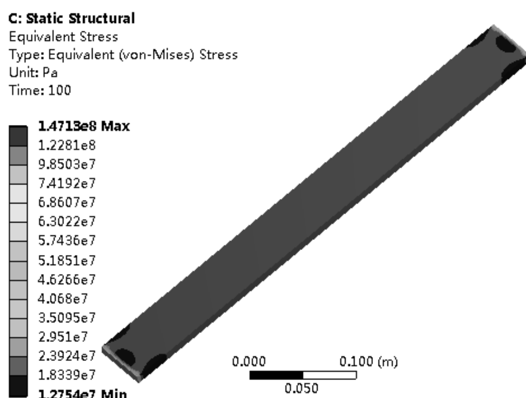


图 11-102　应力分布云图

Step19：返回到 Workbench 平台，选择 Toolbox 栏中的 Modal 并将其一直拖曳到 C6 列中，此时将建立一个模态分析流程图，如图 11-103 所示。

Step20：返回到 Mechanical 分析平台中，读者会发现此时在 Static Structural（C5）分析树下面多了一个 Modal（D5）分析流程。

Step21：右键单击 Solution（C6），在弹出的快捷菜单中选择 Solve 执行计算。

Step22：右键单击 Modal（D5），在弹出的快捷菜单中选择 Solve 执行计算。

Step23：计算完成后，查看前六阶变形云图与自振频率图如图 11-104～图 11-106 所示。

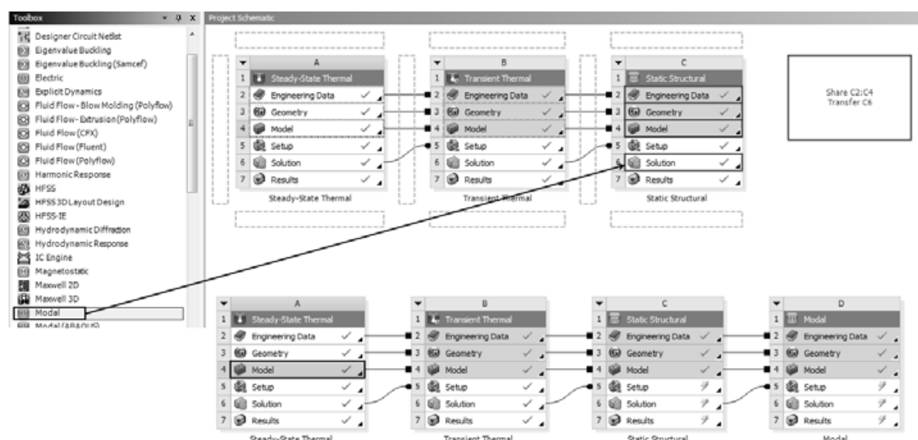


图 11-103 流程图

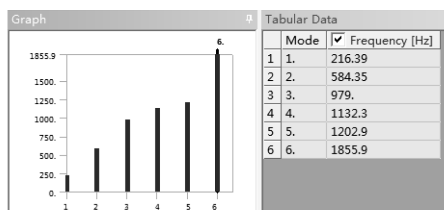


图 11-104 各阶频率

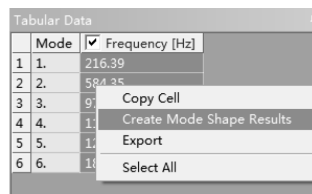


图 11-105 快捷菜单选择频率并生成云图

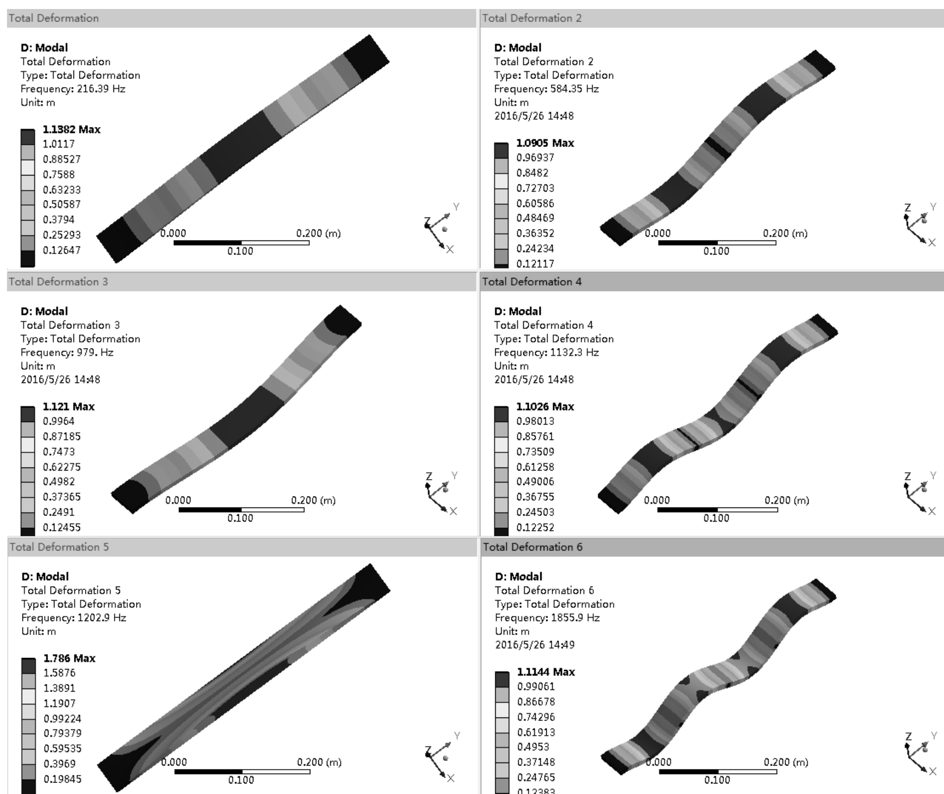


图 11-106 前六阶变形

至此，ANSYS Workbench 中降温时模态分析的建模及求解方法就介绍完了。下面小节（11.4.13～11.4.17 小节）将为大家详细介绍无温度变化时模态分析的建模方法及求解过程。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中模态分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter11\char11-2\MODAL.wbpj

11.4.13 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目，如图 11-107 所示。

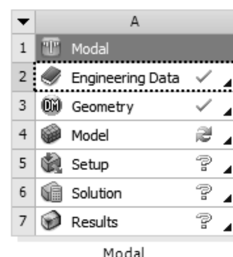


图 11-107 创建分析项

11.4.14 创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 项上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler Geometry 命令，如图 11-108 所示。

Step2：在启动的 DM 几何建模窗口中进行几何创建。设置长度单位为 mm，依次选择菜单，在坐标原点创建一个矩形，并将矩形的两条边分别设置为 50mm 和 500mm，如图 11-109 所示。

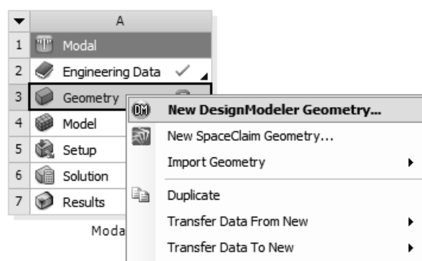


图 11-108 导入几何体

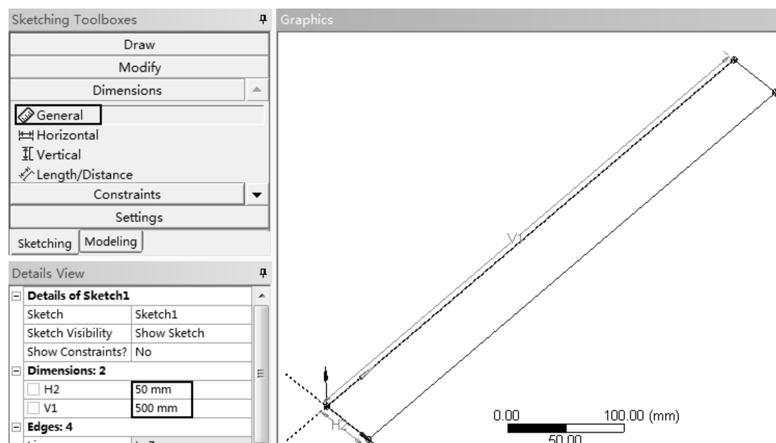


图 11-109 草绘

Step3：选择工具栏中的 Extrude 命令，在弹出的如图 11-110 所示的 Details View 详细设

置面板中作如下操作：在 Geometry 栏中选择刚才建立的草绘 Sketch1；在 FD1,Depth（>0）栏中输入厚度为 10mm，其余默认即可，并单击工具栏中的 Generate 命令生成几何。

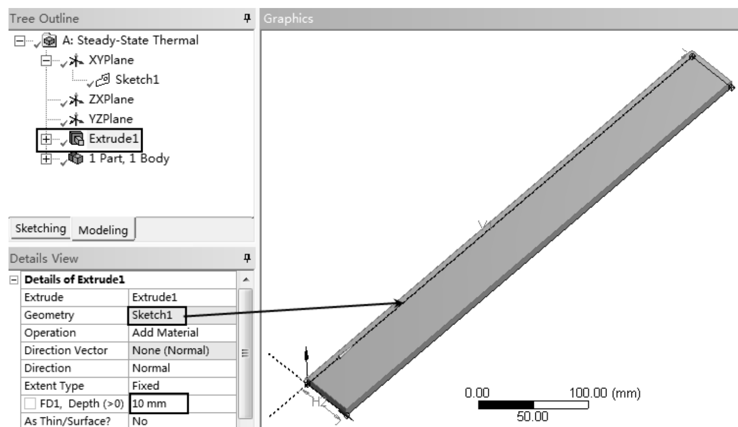


图 11-110 实体

Step4：单击工具栏中的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 MODAL.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

11.4.15 创建分析项目

Step1：在 Workbench 主界面双击 A2：Engineering Data 项，进入 Mechanical 热分析的材料设置界面。

Step2：在 Outline of Schematic A2：Engineering Data 栏的 Material 中输入材料的名称为 mat，然后从左侧的 Toolbox 栏中选择以下三项参数到 mat 中：Density 输入为 4450，Isotropic Elasticity 的数值为 1.05E11，Poisson’s Ratio（泊松比）的数值为 0.39，如图 11-111 所示。

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	mat			I	
4	Structural Steel			G	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: mat

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	4450	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1E-05	C^-1		
5	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	50	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modu...			
8	Young's Modulus	1.05E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.39			
10	Bulk Modulus	1.5909E+11	Pa		
11	Shear Modulus	3.777E+10	Pa		

图 11-111 设置材料物理属性

Step3：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 11−112 所示的 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

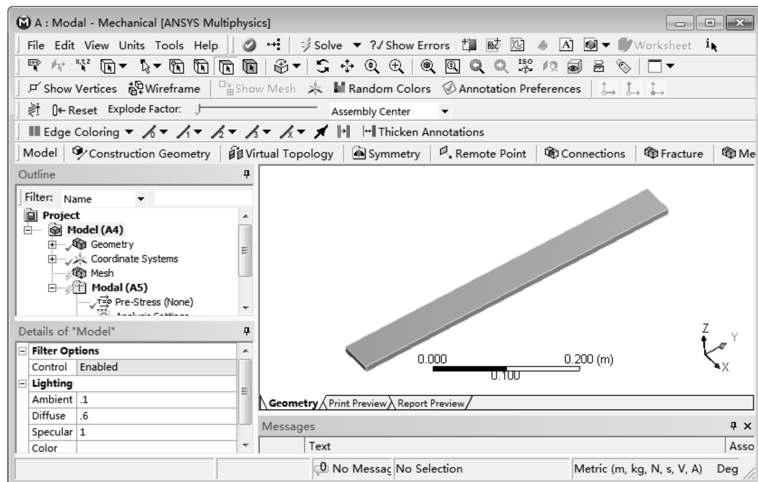


图 11−112　Mechanical 界面

Step4：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中，选择 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 11−113 所示。

Step5：在参数列表中的 Material 下单击 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 mat，选择即可将其添加到模型中去。

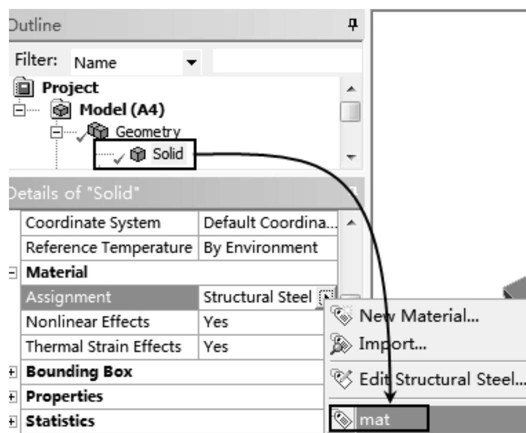


图 11−113　修改材料属性

11.4.16　划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置窗口的 Element Size 栏中输入 2.e−003m，如图 11−114 所示。

Step2：右键单击 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 11−115 所示。

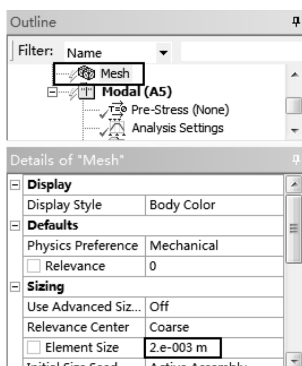


图 11-114　网格设置

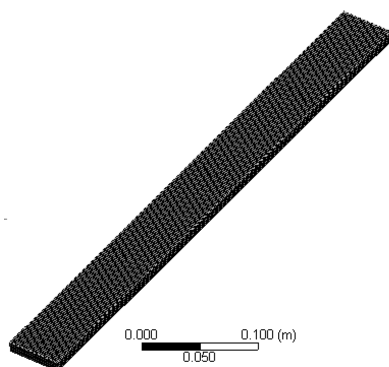


图 11-115　网格效果

11.4.17　施加载荷与约束

Step1：单击 Modal（A5），然后在工具栏中依次选择 Supports→Fixed Support（固定约束）命令，如图 11-116 所示。

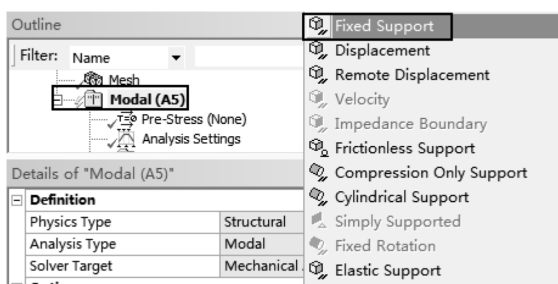


图 11-116　菜单

Step2：在下面出现的 Details of“Fixed Support”面板中作如下设置，如图 11-117 所示：在 Geometry 栏中选择平板的两底面，其余默认即可；选择工具栏中的 Generate 命令。

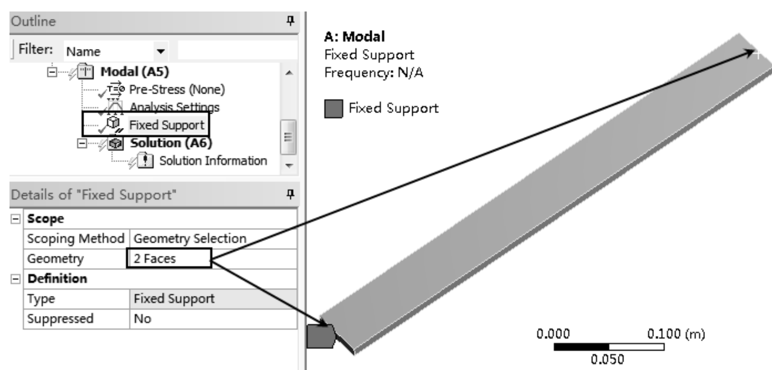


图 11-117　设置

Step3：右键单击 Modal（A5），在弹出的快捷菜单中选择 Solve 执行计算。

Step4：计算完成后，查看前六阶变形云图与自振频率图，如图 11−118～图 11−120 所示。

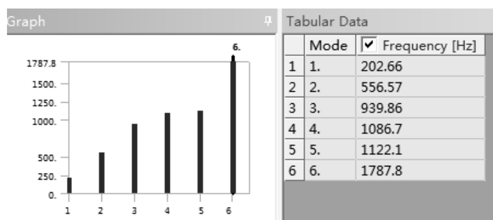


图 11−118　各阶频率

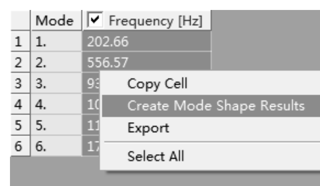


图 11−119　快捷菜单选择频率并生成云图

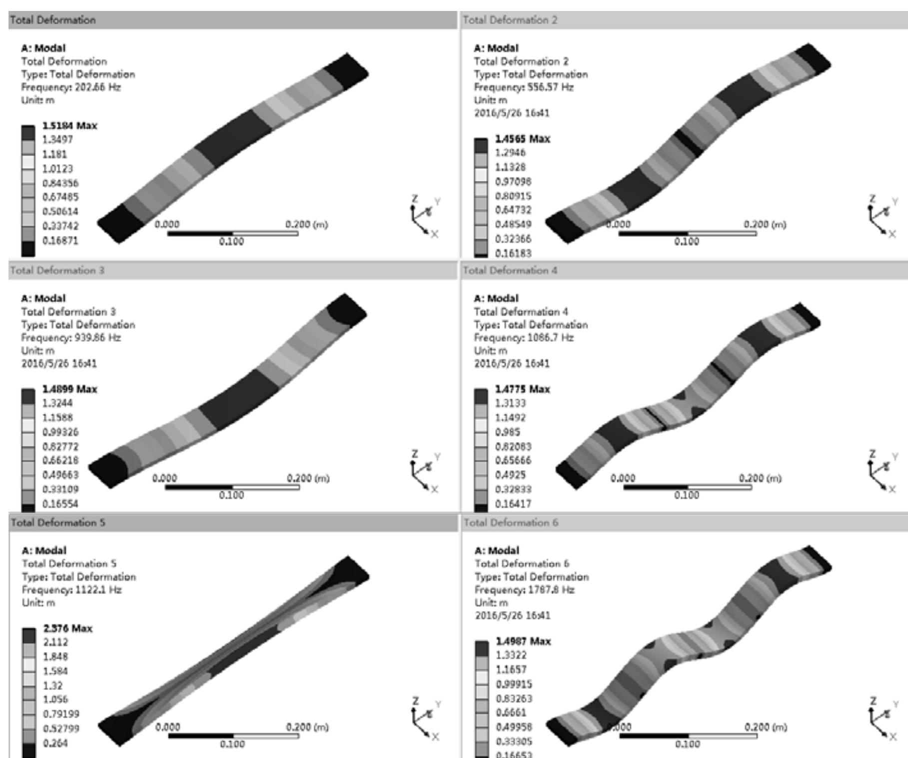


图 11−120　前六阶变形

以上三个分析分别针加热后、冷却后及无温度变化三种状态的模态进行分析，最后得到的三种工况下的前六阶频率见表 11−2。

表 11−2　三种工况的前六阶频率（单位：Hz）

	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶	第六阶
加热后模态	135.96	486.74	965.77	1029.5	1194	1749.8
无温度变化模态	202.66	556.57	939.86	1086.7	1122.1	1787.8
冷却后模态	216.39	584.35	979	1132.3	1202.3	1855.9

从表 11−2 可以看出，加热后结构的模态＜无温度变化结构的模态＜冷却后结构的模态。

11.5　热应力案例三——热疲劳

疲劳是指材料、零部件或者机构件在不断的循环载荷作用下，某点或者某些点会产生局部的永久性破坏，并且在经过一定循环次数后出现裂纹或者使裂纹进一步扩展变大直到完全断裂的一种现象。

按形式和过程的不同，外加负荷小且使用寿命较长的疲劳称为高周疲劳或是应力疲劳；相反，外加负荷高且使用寿命较短的疲劳称为低周疲劳或是应变疲劳。按所受载荷的不同可分为四种形式：机械疲劳是由于外加循环负荷作用导致；蠕变疲劳是由于在高温环境中循环负荷作用导致；热机械疲劳是由于循环机械负荷和循环热负荷共同作用导致；热疲劳是由于材料因为受到循环热应力作用而龟裂导致。

学习目标：

熟练掌握 ANSYS Workbench 平台中热疲劳分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter11\char11-3\Tem_Stru_Fatigue.wbpj

11.5.1　案例描述

某平板尺寸为 100mm×50mm×10mm，如图 11-121 所示，材料为默认的 Structural Steel。现将些金属板加热到 600 ℃并将传热过程简化为对流传热。求该平板在此交变应力下的疲劳情况。



图 11-121　模型

11.5.2　启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析）选项创建一个稳态热分析项目，然后右键单击 A6 项，在弹出的快捷菜单中插入一个 Static Structural（静态结构分析）项目，此时即可在 Project Schematic（项目管理区）创建图 11-122 所示的热应力分析项目流程。

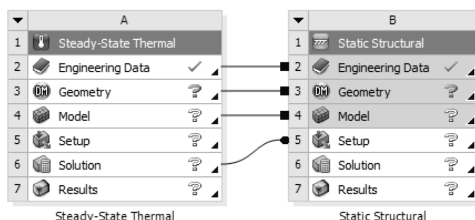


图 11-122　热应力分析流程

11.5.3　创建几何体模型

Step1：在 A3：Geometry 项上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 New DesigneModeler



Geometry 命令，如图 11−123 所示，此时会进入 DesignModeler 几何建模窗口，在 DesignModeler 几何建模窗口中可以进行几何建模与模型有限元分析的前处理及几何修复等工作任务。

Step2：在启动的 DesignModeler 几何建模窗口中进行几何创建。建模前首先要设置模型的单位制，根据案例的模型大小，选择 Units 菜单下面的 millimeter 选项来设置当前模型的长度单位制为 mm；然后在模型树中选择 XYPlane，在下面的选项卡中选择 Sketching 选项卡进入到草绘控制界面，单击 Draw 子选项卡中的 Rectangular（矩形）命令，然后将矩形的第一个角点定义在坐标原点上，即鼠标单击草绘平面的原点，然后向右上角移动鼠标拉开一定的距离后定义第二个角点，此时创建了一个矩形（在第一坐标系中）。

Step3：单击 Dimensions：2 子选项卡，对几何尺寸进行标注和控制，此时默认的 General 尺寸标注已被选中，首先单击 X 轴上的一条边，在 Details View 面板中出现了 H1 标记，在 H1 栏中输入长度为 50mm；单击最右侧的竖直方向的直线，此时 Details View 面板中出现了 V2 标记，在 V2 栏中输入长度为 100mm，此时几何尺寸将根据标注的大小进行自动调节，如图 11−124 所示。

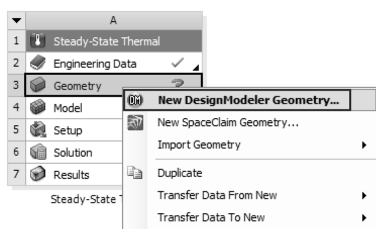


图 11−123　导入几何体

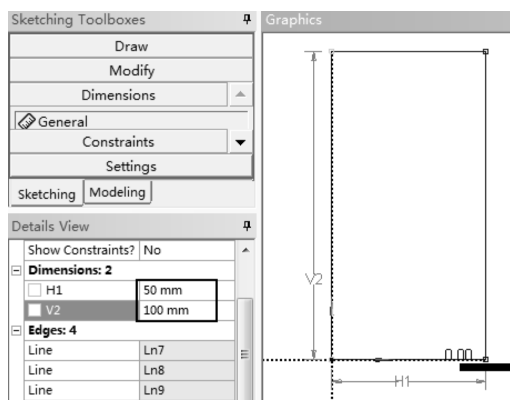


图 11−124　草绘及标注

Step4：草绘完成后，单击 Modeling 选项卡切换到实体建模窗口，然后选择工具栏中的 Extrude（拉伸）命令，在弹出的如图 11−125 所示的 Details View 详细设置面板中作如下操作：在 Details of Extrude1 下面的 Geometry 栏中选择刚才建立的草绘 Sketch1；在 FD1,Depth（>0）栏中输入厚度为 10mm，其余默认即可，并选择工具栏中的 Generate 命令生成几何实体，如图 11−125 右侧所示。

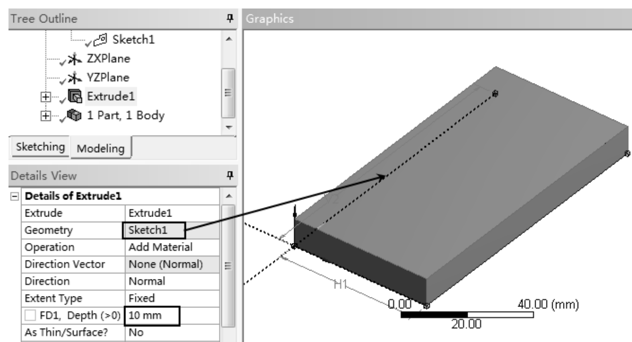


图 11−125　几何实体

Step5：单击 DesignModeler 几何建模窗口中工具栏上的（保存）按钮，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 Tem_Stru_Fatigue.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step6：回到 DesignModeler 界面，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

11.5.4 材料设置

Step1：在 Workbench 主界面中双击 A2：Engineering Data 项进入 Mechanical 热应力分析的材料设置界面。

Step2：Structural Steel 属性如图 11-126 所示，其中包含热和物理属性，以及疲劳特性。

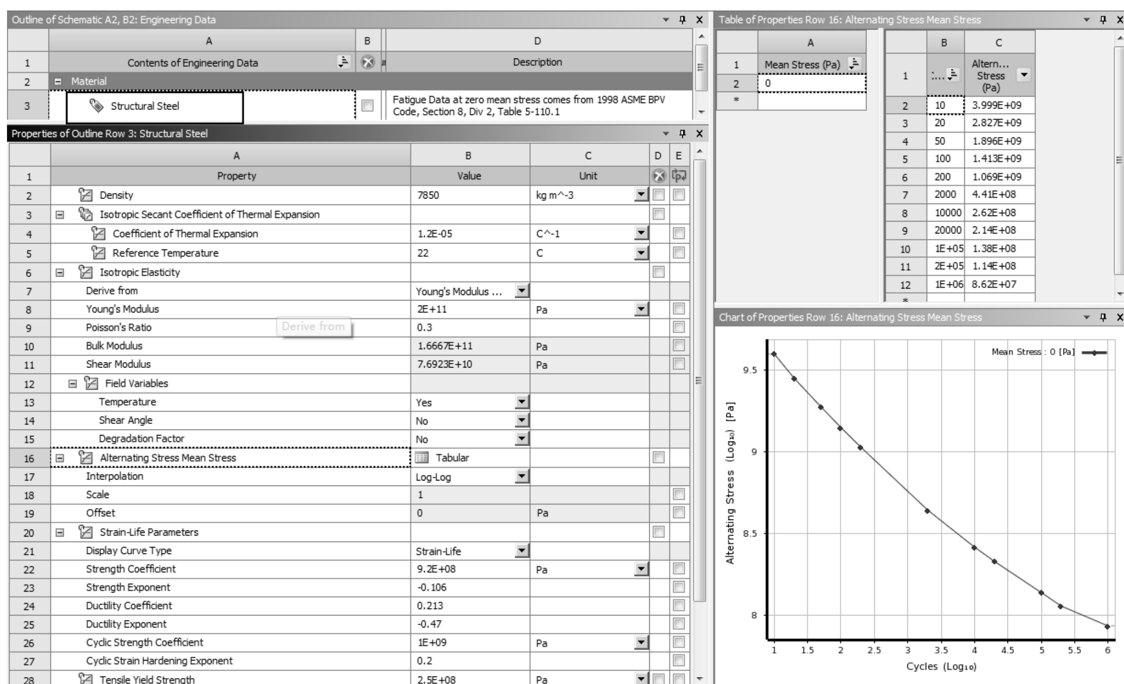


图 11-126 设置材料热属性

Step3：材料热物理属性设置完成后，关闭材料属性设置窗口。双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3：Model 项，进入图 11-127 所示的 Mechanical 界面，在该界面下可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step4：在 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中选择 Geometry 选项下的 Solid，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 11-128 所示。

Step5：单击参数列表中 Material 下的 Assignment，此时可以看到默认的 Structural Steel 已被添加到模型中。

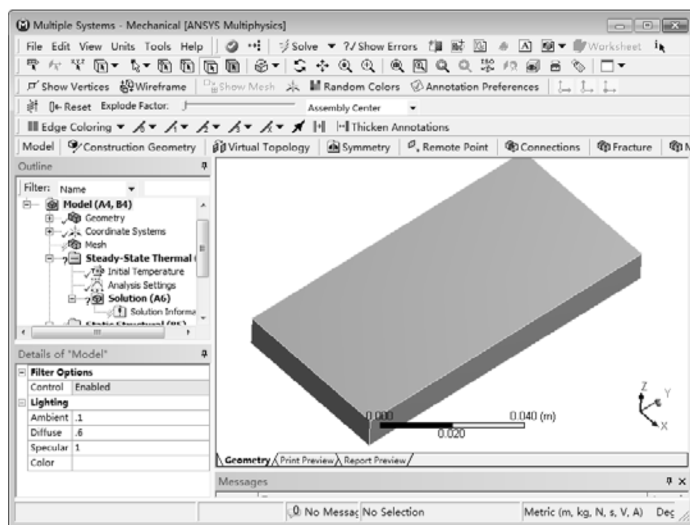


图 11-127　Mechanical 界面

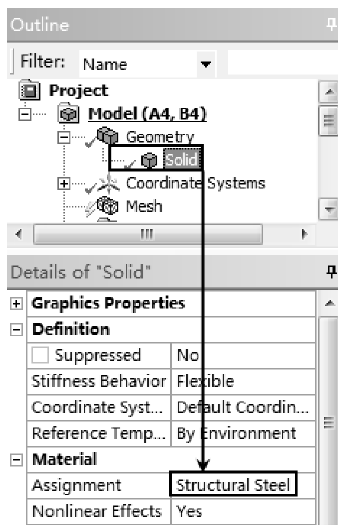


图 11-128　修改材料属性

11.5.5　划分网格

Step1：右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在详细设置窗口的 Element Size 栏中输入 2.e−003m，如图 11-129 所示。

Step2：右键单击 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 11-130 所示。

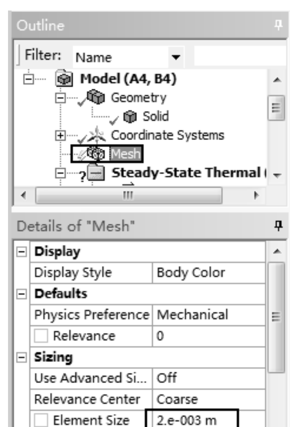


图 11-129　网格设置

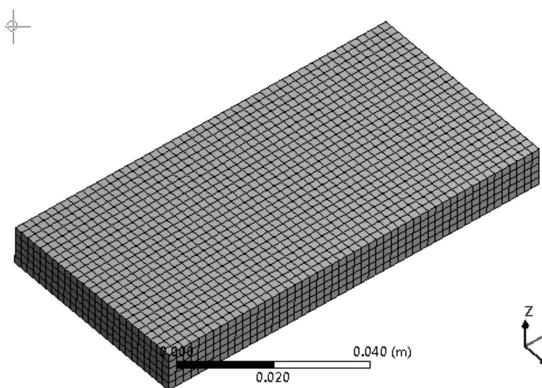


图 11-130　网格效果

11.5.6　施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，此时会出现图 11-131 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中出现 Temperature 选项，如图 11-132 所示。

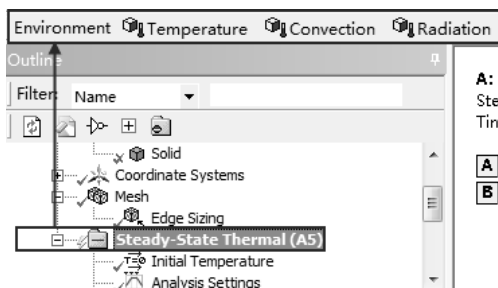


图 11-131　Environment 工具栏

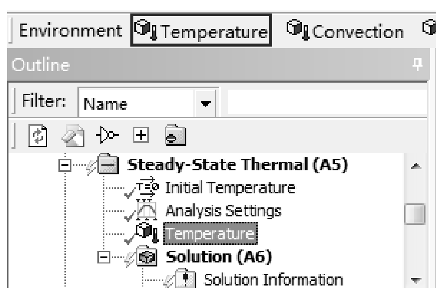


图 11-132　添加载荷

Step3：如图 11-133 所示，选中 Temperature，在下面出现的 Details of“Temperature”中作如下操作：在 Geometry 中选择选择长方体；在 Definition→Magnitude 栏中输入 600；其余默认即可，完成一个温度的添加。

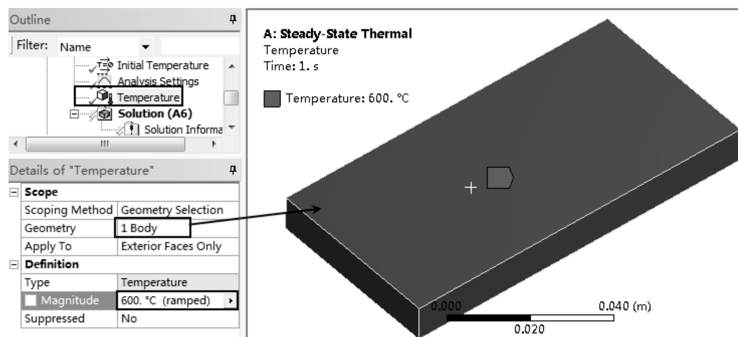


图 11-133　添加温度

Step4：右键单击 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（A5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-134 所示。

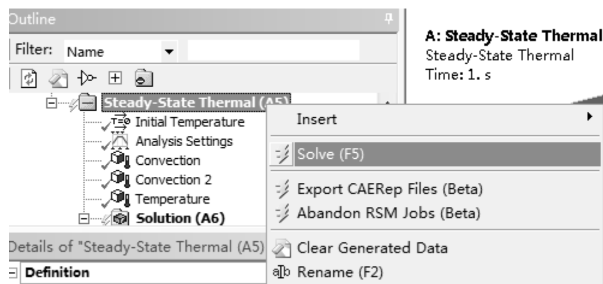


图 11-134　求解

11.5.7　结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 11-135 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 11-136 所示，此时在分析树中出现 Temperature（温度）选项。

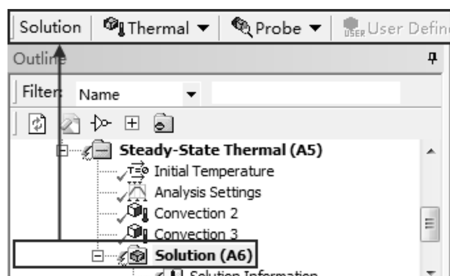


图 11-135　Solution 工具栏

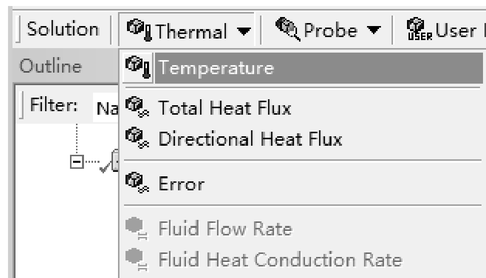


图 11-136　添加温度选项

Step3：右键单击 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11-137 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Temperature（温度），如图 11-138 所示。

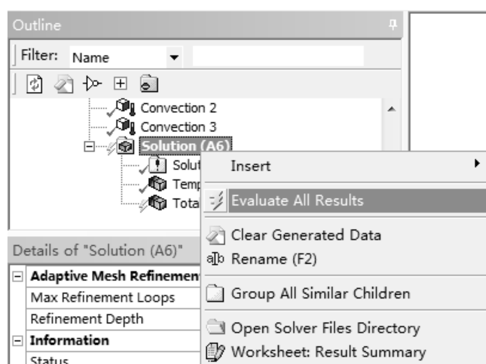


图 11-137　快捷菜单

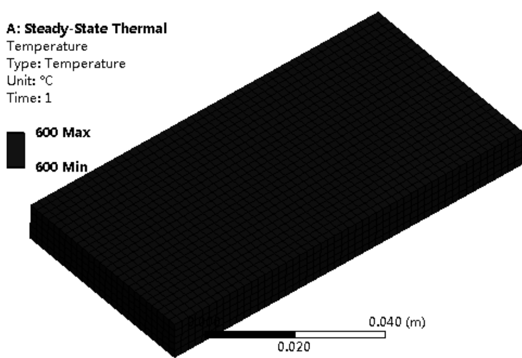


图 11-138　温度分布

Step5：选择 Static Structural（B5）选项，右键依次选择 Static Structural（B5）→Imported Load（B6）→Imported Body Temperature 选项，在弹出的图 11-139 所示的快捷菜单中选择 Import Load 命令。

Step6：成功导入温度分布结果后显示图 11-140 所示的云图，对比可以看出此时显示的温度分布结果。

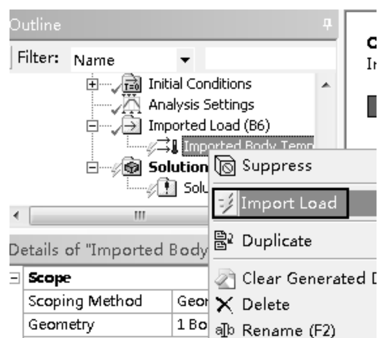


图 11-139　快捷菜单

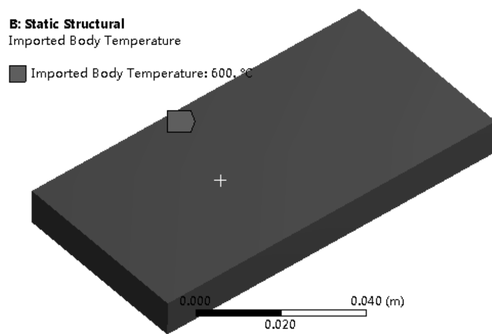


图 11-140　温度分布

Step7：单击 Static Structural（B5），然后在工具栏中依次选择 Supports→Fixed Support（固定约束）选项，如图 11-141 所示。

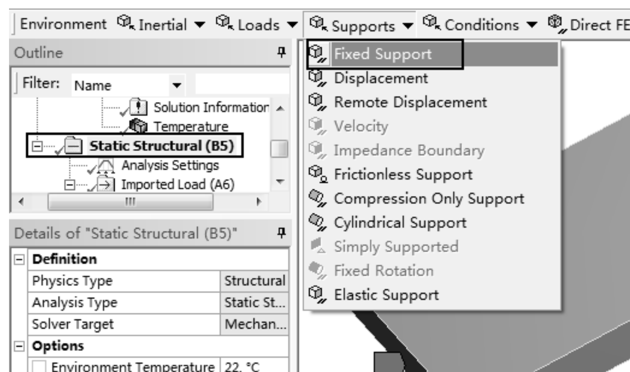


图 11-141 菜单

Step8：在下面出现的 Details of“Fixed Support”面板中作如下设置，如图 11-142 所示，在 Geometry 栏中选择平板的两个端面，其余默认即可；选择工具栏中的 Generate 命令。

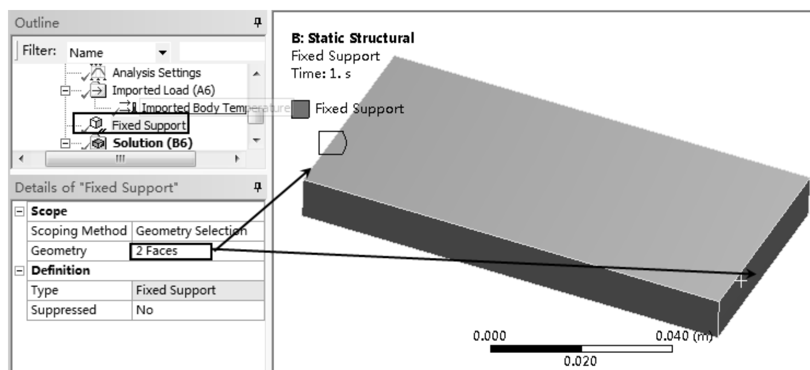


图 11-142 设置

Step9：单击 Solution（B6），在工具栏中选择 Deformation 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，此时经过一段时间的运算将显示图 11-143 所示的变形云图。

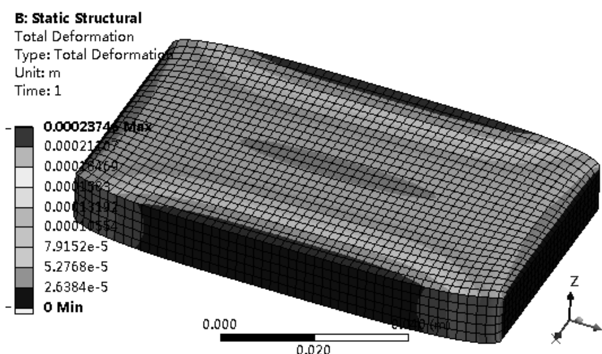


图 11-143 变形云图

Step10：单击 Solution（B6），在工具栏中选择 Equivalent Stress 选项，并选择工具栏中的 Generate 命令，此时经过一段时间的运算将显示图 11−144 所示的应力分布云图。

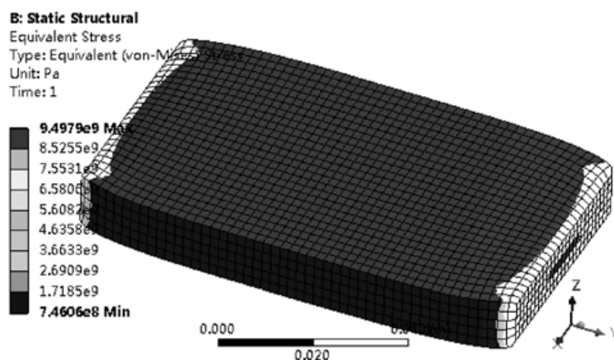


图 11−144　应力分布云图

Step11：右键单击 Solution（B6），在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool 选项，如图 11−145 所示，插入一个疲劳分析工具。

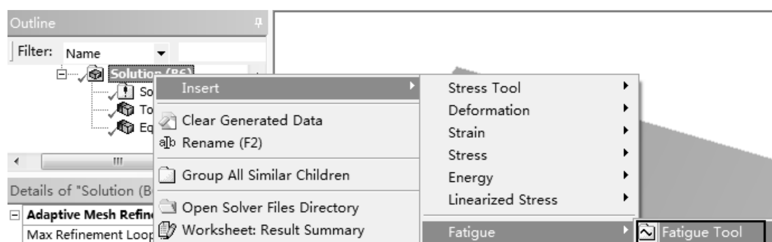


图 11−145　插入疲劳分析工具

Step12：右键单击 Fatigue Tool 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Life/Damage/Safety Factor/Biaxiality Indication/Equivalent Alternating Stress 五个选项，如图 11−146 所示。

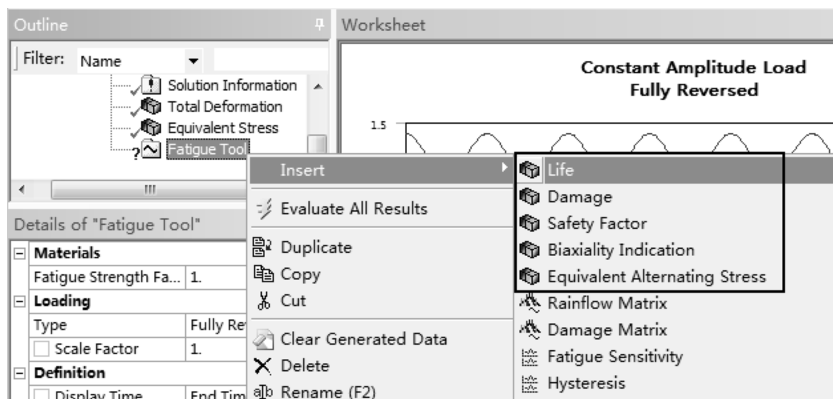


图 11−146　插入选项

Step13：经过一段时间的计算，单击 Fatigue Tool 工具下面的 Life 选项，将显示图 11-147 所示的寿命分布图，从图中可以看出两端的寿命比较小，中间绝大部分结构的寿命较高。

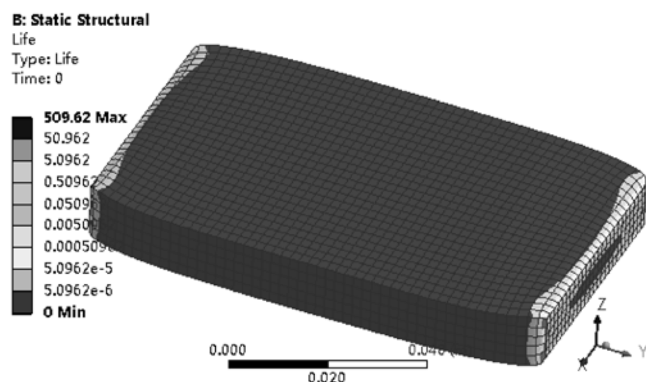


图 11-147　寿命分布图

Step14：单击 Fatigue Tool 工具下面的 Damage 选项，将显示图 11-148 所示的损伤分布图。

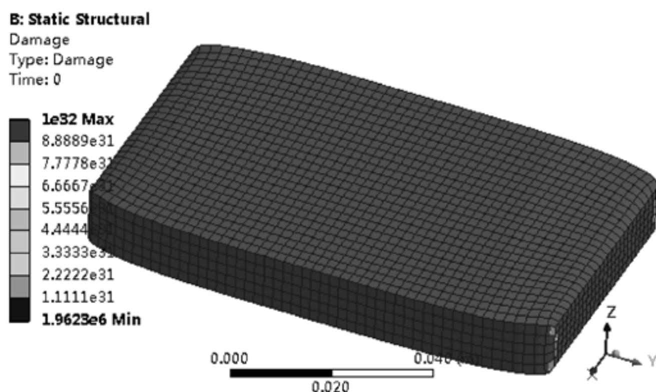


图 11-148　损伤分布图

Step15：单击 Fatigue Tool 工具下面的 Safety Factor 选项，将显示图 11-149 所示的安全系数分布图。

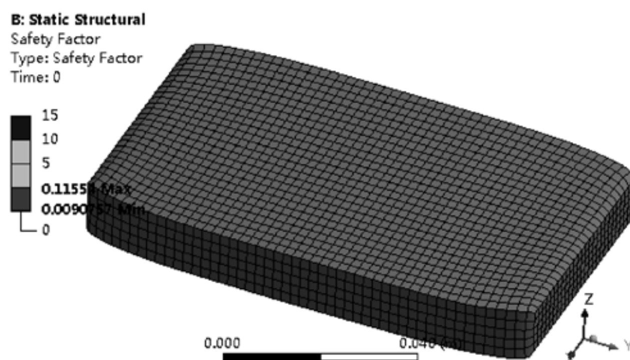


图 11-149　安全系数分布图

Step16： 单击 Fatigue Tool 工具下面的 Biaxiality Indication 选项，将显示图 11-150 所示的双轴指示图。

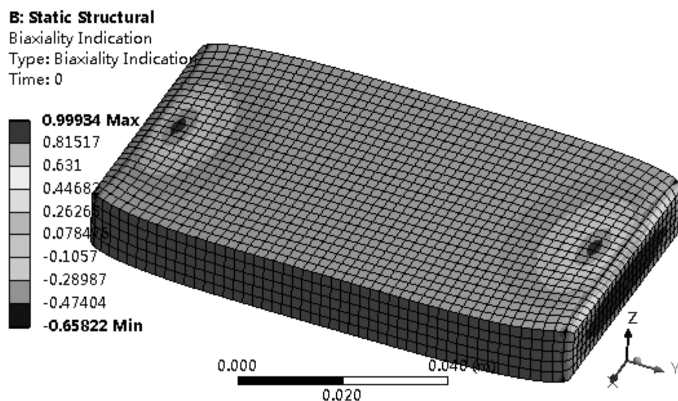


图 11-150　双轴指示图

Step17： 单击 Fatigue Tool 工具下面的 Equivalent Alternating Stress 选项，将显示图 11-151 所示的等效交变应力图。

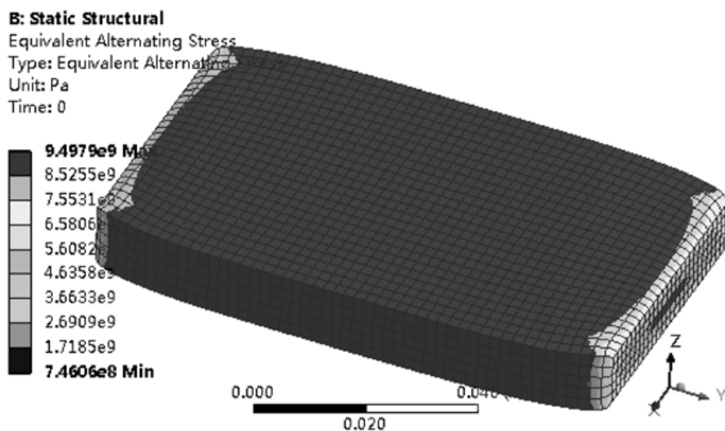


图 11-151　等效交变应力图

注： 这里的 Fatigue Tool 中的设置采用了默认的设置，但是读者可以看到 Fatigue Tool 下面的设置非常丰富：

Fatigue Strength Factor（强度因子）：除了平均应力的影响外，还有其他一些影响 S-N 曲线的因素，这些其他影响因素可以集中体现在疲劳强度（降低）因子 Kf 中，其值可以在 Fatigue Tool 的细节栏中输入，这个值小于 1，以便说明实际部件和试件的差异，所计算的交变应力将被这个修正因子 Kf 分开，而平均应力却保持不变。

Analysis Type 栏中的默认选项是 Stress Life（应力寿命），此外还有 Strain Life（应变寿命），如图 11-152 所示。

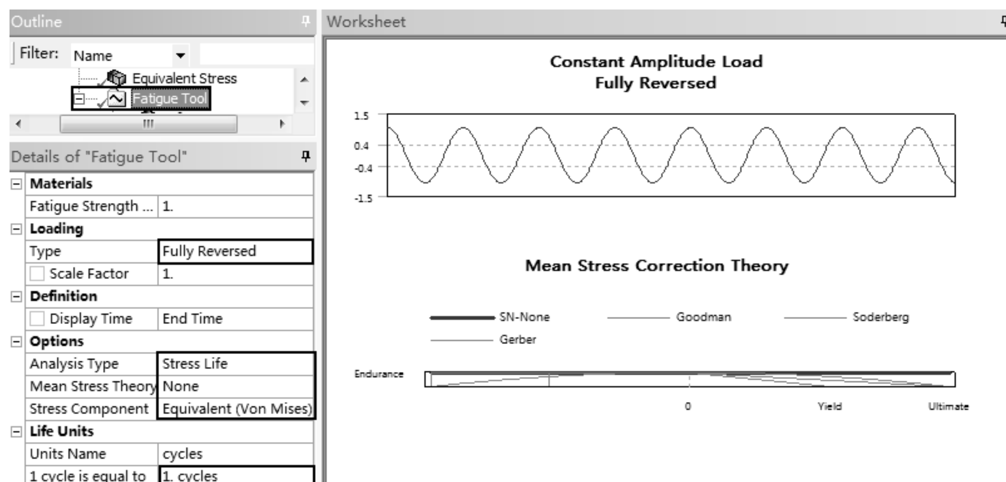


图 11-152 Fatigue Tool

Mean stress Theory 栏中有以下五个选项，其中默认为 None。

- None：忽略平均应力的影响。
- Goodman：理论上适用于低韧性材料，不能对压缩平均应力做修正。
- Soderberg：理论上比 Goodman 理论更保守，并且在有些情况下可以用于脆性材料。
- Gerber：理论上能够对韧性材料的拉伸平均应力提供很好的拟合，但它不能正确地预测出压缩平均应力的有害影响。
- Mean stress Curves：使用多重 S-N 曲线（如果定义的话）。

读者仅需对各个设置有一定的了解即可，如果想深入学习，请参考相关教材或者帮助文档。

11.5.8 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical，返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

11.6 本章小结

本章节以热产生应力的基本理论知识为出发点，介绍了热是如何产生应力的，然后通过几个典型案例分别介绍了热应力的基本应用与操作、热对结构模态的影响与基本操作以及热对结构疲劳产生的影响。通过本章节的学习，读者应该对 ANSYS Workbench 平台的热应力、热对模态的影响及热疲劳的分析方法及操作过程有详细的认识。

第 12 章　热流耦合分析

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是流体力学的一个分支，它通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关信息，实现了用计算机代替试验装置完成“计算试验”，为工程技术人员提供了实际工况模拟仿真的操作平台，已广泛应用于航空航天、热能动力、土木水利、汽车工程、铁道、船舶工业、化学工程、流体机械和环境工程等领域。

ANSYS Workbench 平台中基于流体动力学原理的热流耦合分析模块有 ANSYS CFX、ANSYS FLUENT 及 ANSYS IcePak 三种，这三种模块根据应用领域的不同各有优点。

本章主要讲解 ANSYS CFX、ANSYS LUENT 及 ANSYS IcePak 模块基于流体动力学的分析流程，包括几何导入、网格划分、前处理、求解及后处理等。

知识点＼学习目标	了　解	理　解	应　用	实　践
流体力学基本知识		√		
流体微分方程	√			
ANSYS CFX 计算过程			√	√
ANSYS LUENT 计算过程			√	√
ANSYS ICEPAK 计算过程			√	√

12.1　流体动力学实例一——CFX 流场分析

ANSYS CFX 是 ANSYS 软件下模拟工程实际传热与流动问题的商用程序包，它是在复杂几何、网格、求解这三个 CFD 传统瓶颈问题上均获得突破的商用 CFD 软件包，其特点如下。

（1）精确的数值方法：CFX 采用了基于有限元的有限体积法，在保证了有限体积法守恒特性的基础上，吸收了有限元法的数值精确性。

（2）快速稳健的求解技术：CFX 是全隐式多网格耦合求解技术的商业化程序包，这种求解技术克服了传统算法需要“假设压力项—求解—修正压力项”的反复迭代过程，而且能同时求解动量方程和连续性方程。

（3）丰富的物理模型：CFX 程序包拥有丰富的通用物理模型，可解决流体流动、传热、辐射、多项流、化学反应、燃烧等问题；还拥有诸多实用模型，可用于处理气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等大量复杂现象。

（4）领先的流固耦合技术：借助 ANSYS 在多物理场方面深厚的技术基础及 CFX 在流体力学分析方面的领先优势，ANSYS+CFX 强强联合，推出了流固耦合（FSI）技术，能够完成流固单向耦合及流固双向耦合分析。

（5）集成环境与优化技术：ANSYS Workbench 平台提供了从分析开始到结束的统一环境，使用者的工作效率得到了提高。在 ANSYS Workbench 平台下，所有设置都是统一的，并且可以和 CAD 数据相互关联，并进行参数化传递。

学习目标：

熟练掌握 CFX 的流体分析方法及求解过程。

模型文件	网盘\Chapter12\char12-1\mixing_tee.msh
结果文件	网盘\Chapter12\char12-1\CFX_sample.wbpj

12.1.1 问题描述

某图 12-1 所示的 T 型管模型，inlety 流速为 10m/s，温度为 20℃，inletz 流速为 5m/s，温度为 100℃，出口设置为标准大气压，试用 ANSYS CFX 分析其流动特性及热分布。

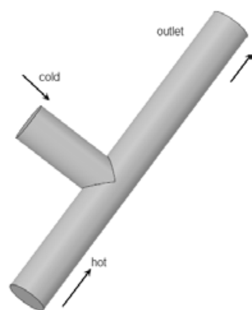


图 12-1 几何模型

12.1.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Fluid Flow（CFX）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 12-2 所示。

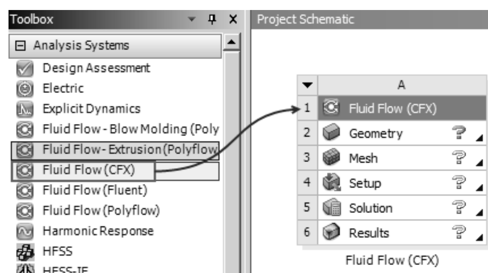


图 12-2 创建分析项目 A

12.1.3 创建几何体模型

Step1：在 A3：Mesh 项上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Mesh File→Browse 命令，如图 12-3 所示。

Step2：弹出“打开”对话框，选择 mixing_tee.msh 文件，单击“打开”按钮。

Step3：双击 A3：Mesh 项，进入到 CFX-Pre 平台，如图 12-4 所示。

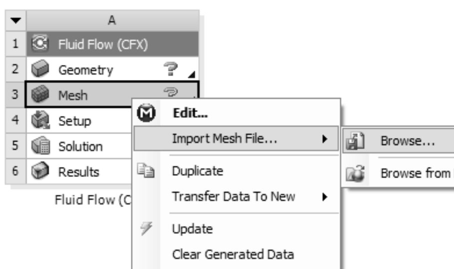


图 12-3 导入网格



图 12-4 生成网格

12.1.4 网格划分

Step1：右键选择 Default Domain，在弹出的图 12−5 所示的快捷菜单中选择 Rename 命令，输入名称为 junction。

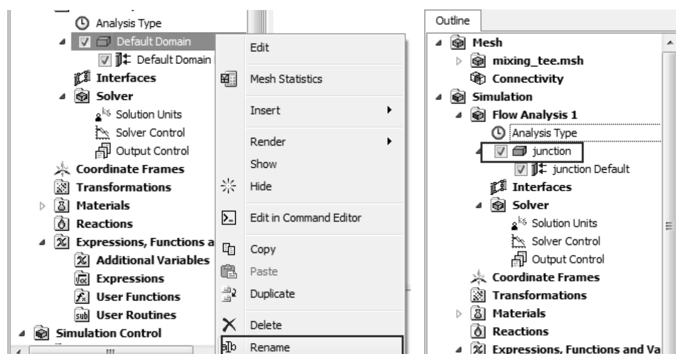


图 12−5　命名

Step2：双击 junction 命令，在出现图 12−6 所示的 Details of junction in Flow Analysis 1 面板中作如下设置：在 Material 栏中选择 Water。

注：CFX 中有大量的材料可供选择，在下拉列表中有常用的几种材料，如果想获得更多的材料，则单击右侧的 ... 按钮，在弹出的图 12−7 所示的 Material 对话框中进行选择。

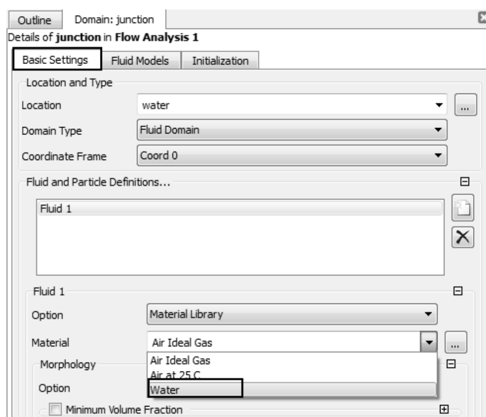


图 12−6　设置

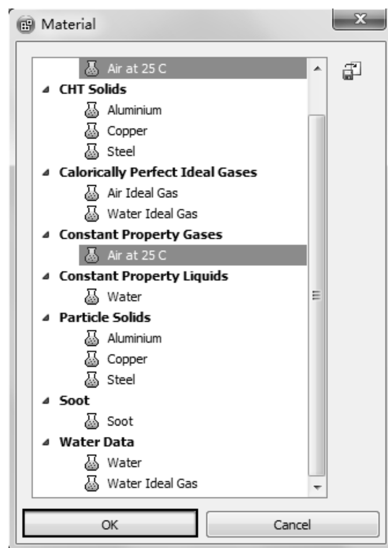


图 12−7　Material 对话框

Step3：切换到 Fluid Models 选项卡，如图 12−8 所示，在选项卡中作如下设置：在 Heat Transfer→Option 栏中选择 Thermal Energy 选项；在 Turbulence→Option 栏中选择 K−Epsilon 选项，单击 OK 按钮。

Step4：如图 12-9 所示，右键选择 junction，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Boundary 选项。

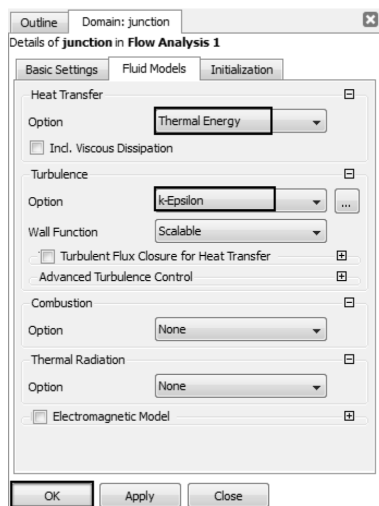


图 12-8 在 Fluid Models 选项卡中设置

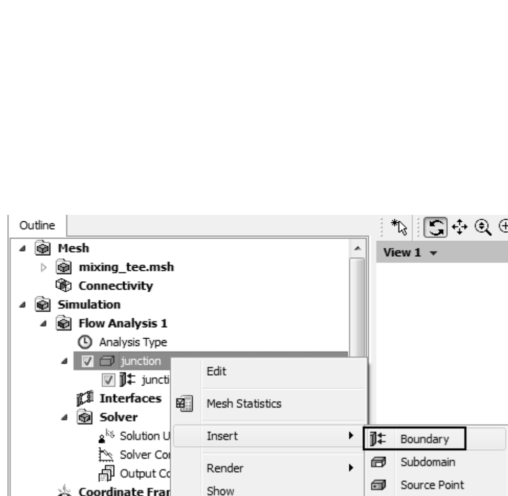


图 12-9 创建边界条件

Step5：在弹出的图 12-10 所示的对话框中输入 inlety 并单击 OK 按钮。

Step6：在弹出的图 12-11 所示的 Boundary：inlety 设置面板中作如下操作：在 Boundary type 栏中选择 Inlet 选项；在 Location 栏中选择 inlet y 选项。

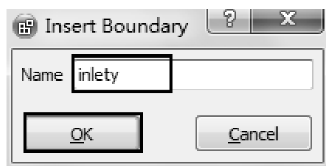


图 12-10 对话框

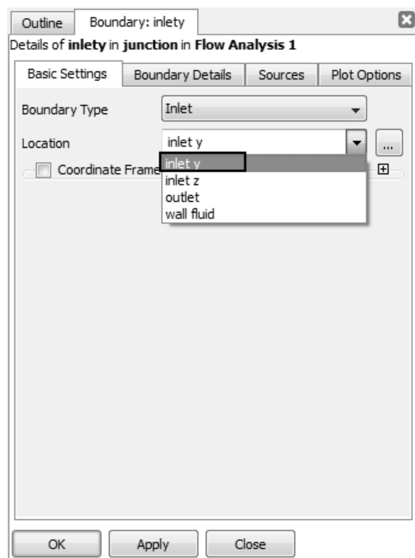


图 12-11 设置

Step7：如图 12-12 所示，切换到 Boundary Details 选项卡，作如下操作：在 NormalSpeed 栏中输入 10；在 Static Temperature 栏中输入 20，在后面的单位选项中选择 C，单击 OK 按钮。

Step8：右键选择 junction，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Boundary 选项。

Step9：在弹出的图 12-13 所示的对话框中输入 inletz 并单击 OK 按钮。

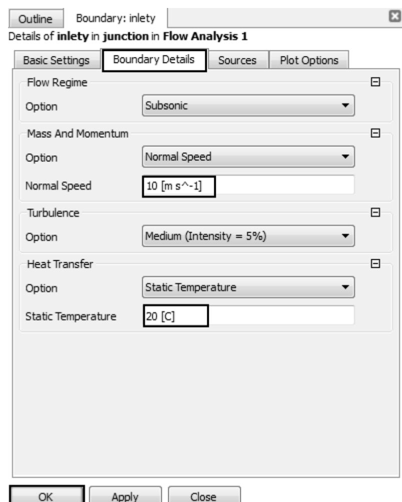


图 12-12　设置 Boundary Details

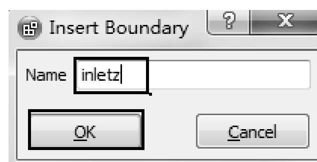


图 12-13　对话框

Step10：在弹出的图 12-14 所示的 Boundary：inletz 设置面板中作如下操作：在 Boundary type 栏中选择 Inlet 选项；在 Location 栏中选择 inlet z 选项。

Step11：如图 12-15 所示，切换到 Boundary Details 选项卡中，作如下操作：在 NormalSpeed 栏中输入 5；在 Static Temperature 栏中输入 100，在后面的单位选项中选择 C，单击 OK 按钮。

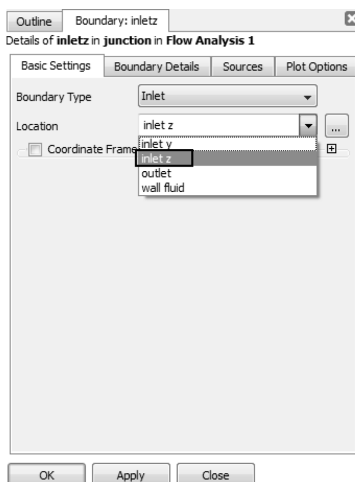


图 12-14　设置 Boundary：inletz

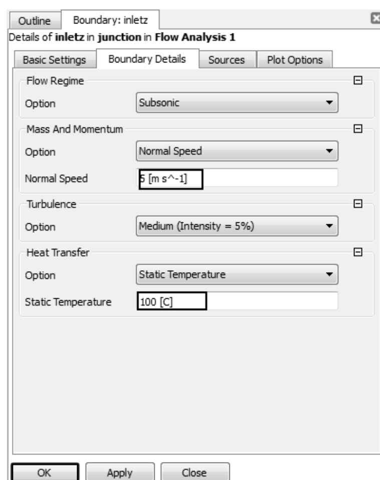


图 12-15　再次设置 Boundary Details

Step12：右键选择 junction，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Boundary 选项。

Step13：在弹出的对话框中输入 outlet 并单击 OK 按钮。

Step14：在弹出的图 12-16 所示的 Boundary：outlet 设置面板中作如下操作：在

Boundary type 栏中选择 outlet 选项；在 Location 栏中选择 outlet 选项。

Step15：如图 12−17 所示，切换到 Boundary Details 选项卡中，作如下操作：在 Relative Pressure 栏中输入 0，单击 OK 按钮。

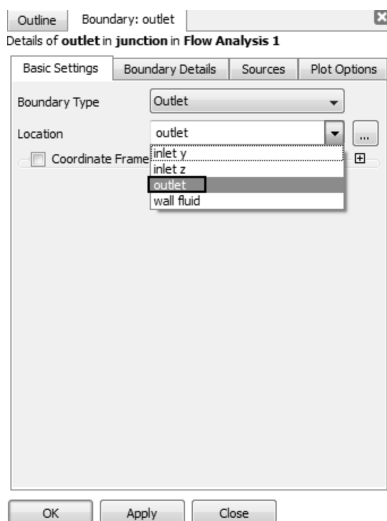


图 12−16　设置 Boundary：outlet

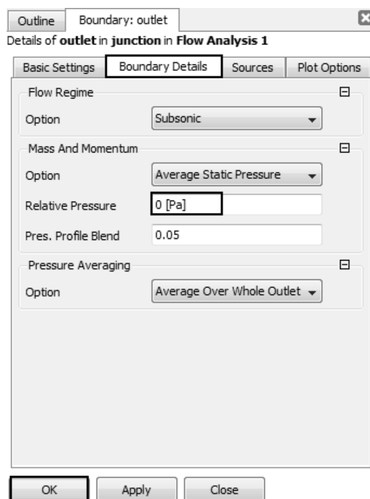
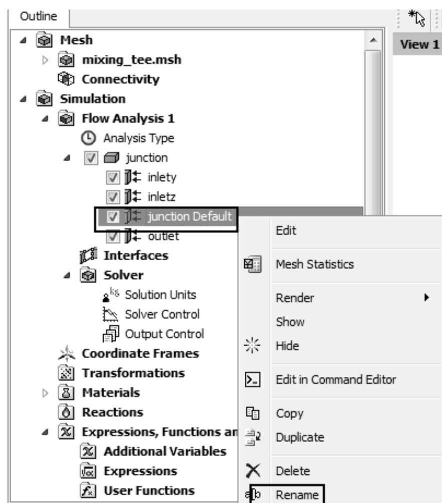


图 12−17　设置 Boundary Details

Step16：右键选择 junction Default，在弹出的图 12−18 所示的快捷菜单中选择 Rename 命令，输入名称为 wall。



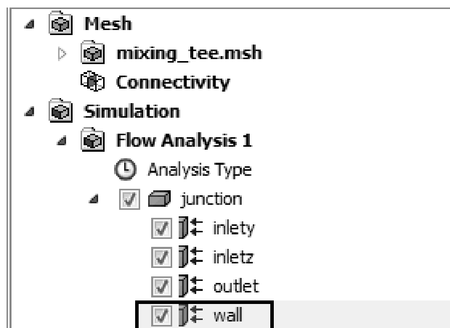


图 12−18　重命名

Step17：右键选择 inlety，在弹出的图 12−19 所示的快捷菜单中选择 Edit in Command Editor 命令，此时将弹出图 12−20 所示的 CCL 命令行。

可以看到，之前在 inlet y 中定义的（如速度、温度流动状态等）设置都将显示在命令行中。

CCL 语言将在后文进行介绍，这里不再赘述。

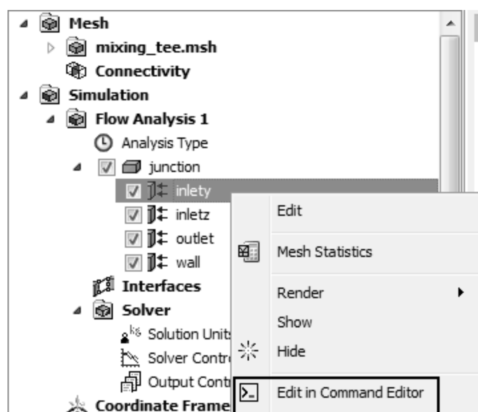


图 12-19 快捷菜单

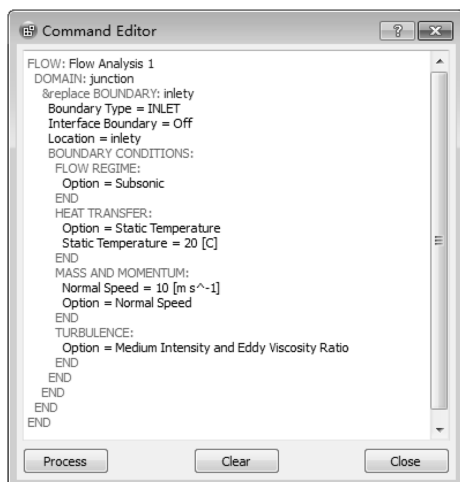


图 12-20 CCL 命令行

12.1.5 初始化及求解控制

Step1：单击工具栏中的按钮，在弹出的图 12-21 所示的初始化设置窗口中保持所有参数及选项为默认状态，单击 OK 按钮。

Step2：双击 Solver Control 选项，在弹出的图 12-22 所示的初始化设置窗口中保持所有参数及选项为默认状态，单击 OK 按钮。

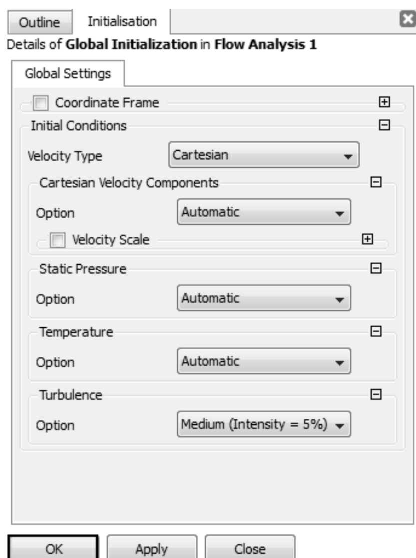


图 12-21 初始化

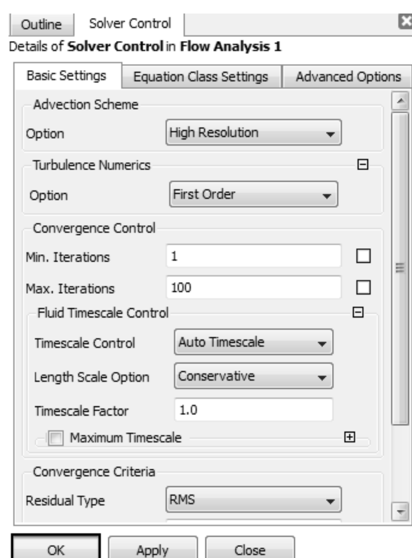


图 12-22 求解设置

Step3：双击 Output Control 选项，在弹出的图 12-23 所示的输出控制面板中作如下设置：选择 Monitor 选项卡；勾选 Monitor Objects 复选框；在 Monitor Points and Expressions 栏中单击按钮；在弹出的对话框中输入 p inlety，单击 OK 按钮。

此时在 Monitor Points and Expressions 栏中显示 p inlety 选项。在 p inlety→Option 栏中选择 Expression 选项；在 Expression Value 栏中单击右侧的按钮，此时左侧的数值输入栏中可以输入表达式；在此栏中输入 areaAve（Pressure）@inlety，如图 12−24 所示。

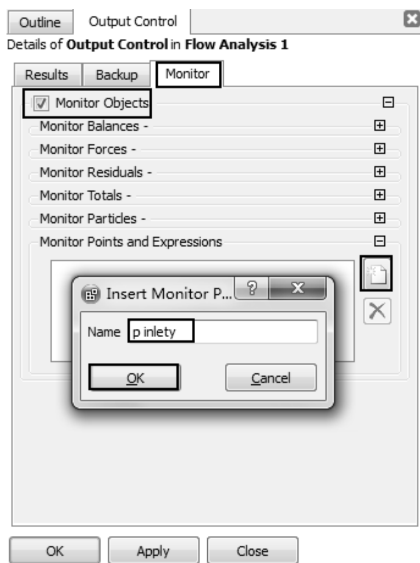


图 12−23　设置

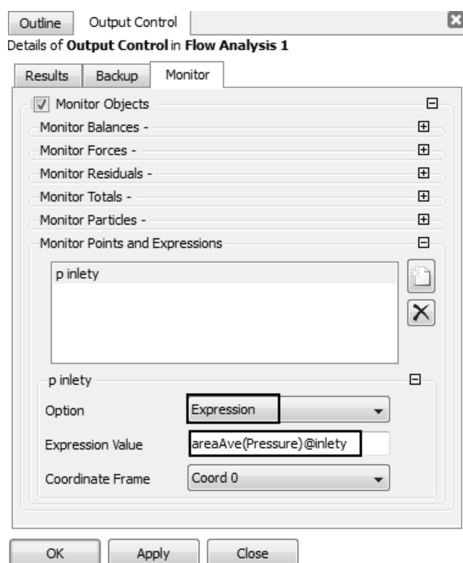


图 12−24　表达式

Step4：在 Monitor Points and Expressions 栏中单击按钮；在弹出的对话框中输入 p inletz，单击 OK 按钮。此时在 Monitor Points and Expressions 栏中显示出 p inletz 选项；在 p inlety→Option 栏中选择 Expression 选项；在 Expression Value 栏中单击右侧的按钮，此时左侧的数值输入栏中可以输入表达式；在此栏中输入 areaAve（Pressure）@inletz，如图 12−25 所示。

Step5：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Fluid Flow（CFX）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFX），返回到 Workbench 主界面。

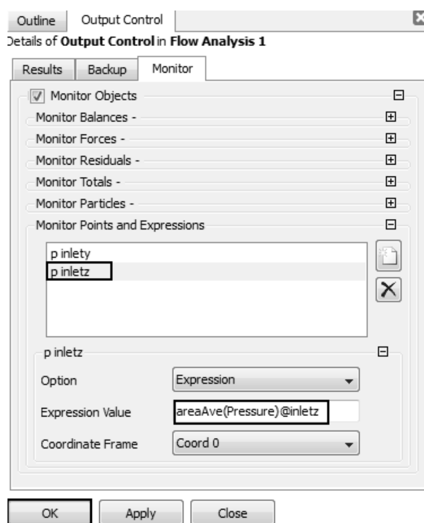


图 12−25　表达式

12.1.6　流体计算

Step1：在 Workbench 主界面中双击项目 A 的 A4：Solution 项，此时会弹出图 12−26 所示的 Define Run 对话框。保持默认设置，单击 Start Run 按钮进行计算。

Step2：此时会出现图 12−27 所示的计算过程监察对话框，对话框左侧为残差曲线，右侧为计算过程，通过设置可以观察许多变量的虚线变化，这里不做详细介绍，请读者参考其他书籍或者帮助文档。



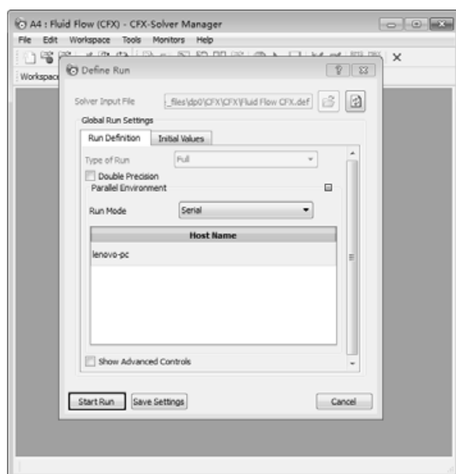


图 12-26　Define Run 对话框

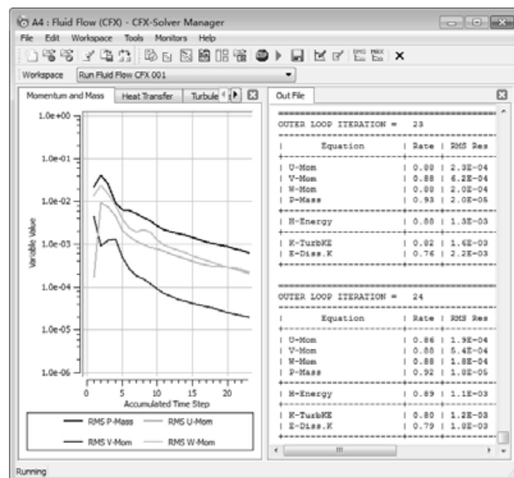


图 12-27　计算过程监察

Step3：图 12-28 所示为刚刚定义的监测点的收敛曲线。

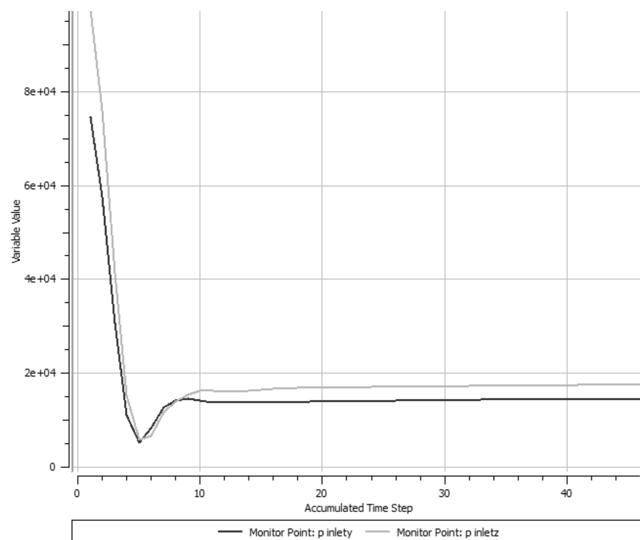


图 12-28　自定义点收敛曲线

Step4：计算成功完成后会弹出图 12-29 所示的提示框，单击 OK 按钮确定。

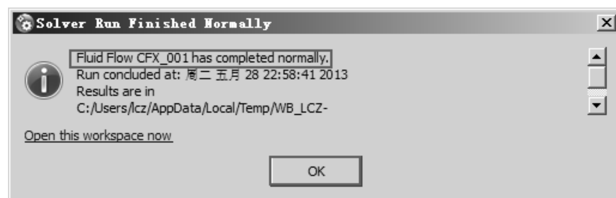


图 12-29　求解完成

Step5：单击 Fluid Flow（CFX）界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFX），返回到 Workbench 主界面。

12.1.7 结果后处理

Step1：返回到 Workbench 主界面后，双击项目 A 中的 A5：Result 项，此时会出现图 12−30 所示的 A5：Fluid Flow（CFX）−CFD−Post 平台。

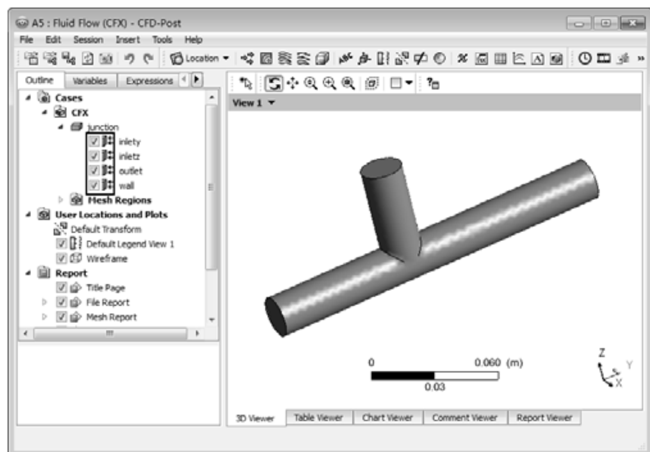


图 12−30 后处理界面

Step2：在工具栏中选择 命令，在弹出的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step3：在图 12−31 所示的 Details of Streamline 1 面板中，选择 Start From 栏中的 inlety，inletz，其余默认，单击 Apply 按钮。

Step4：图 12−32 所示为流体流速迹线云图。

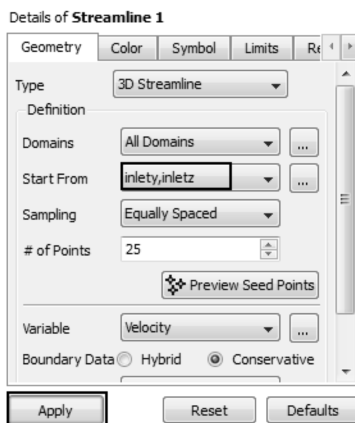


图 12−31 设置流迹线

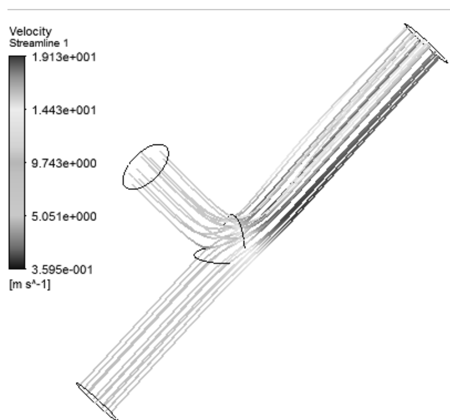


图 12−32 流迹线云图

Step5：在工具栏中选择 命令，在弹出的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step6：在图 12−33 所示的 Details of Contour 1 面板中，选择 Variable 栏中的 Temperature 项，其余默认，单击 Apply 按钮。

Step7：图 12-34 所示为流体温度场分布云图。

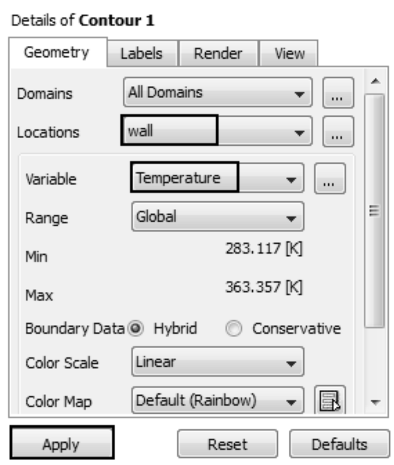


图 12-33　设置云图

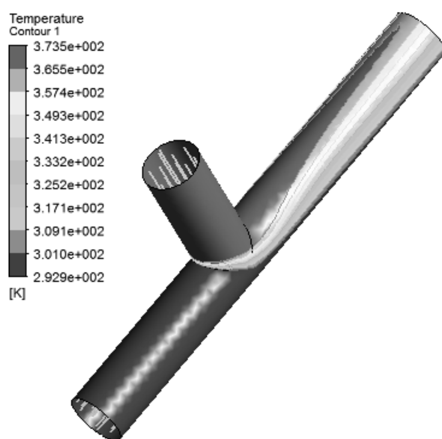


图 12-34　温度场分布云图

Step8：图 12-35 所示为流体压力分布云图。

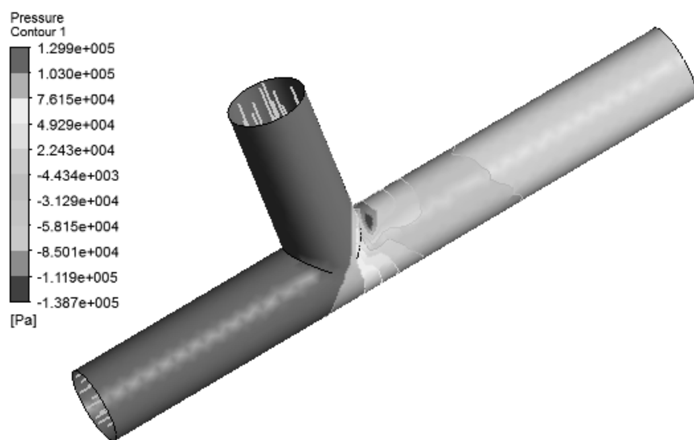


图 12-35　压力分布云图

Step9：读者也可以在工具栏中添加其他命令，这里不再讲述。

Step10：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Fluid Flow（CFD-Post）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFD-Post），返回到 Workbench 主界面。

12.2　流体动力学实例二——Fluent 流场分析

Fluent 是用于模拟具有复杂外形的流体流动及热传导的计算机程序包，具有完全的网格灵活性，用户可以使用非结构网格，例如二维的三角形或四边形网格，三维的四面体、六面体或金字塔形网格来解决具有复杂外形结构的流动。Fluent 具有以下模拟能力。

（1）用非结构自适应网格模拟 2D 或 3D 流场。

（2）不可压缩或可压缩流动。
（3）定常状态或者过渡分析。
（4）无粘、层流和湍流。
（5）牛顿流和非牛顿流。
（6）对流热传导，包括自然对流和强迫对流。
（7）耦合传热和对流。
（8）辐射换热传导模型等。

本节主要介绍 ANSYS Workbench 17.0 的流体分析模块——Fluent 的流体结构方法及求解过程、计算流场及温度分布情况。

学习目标：熟练掌握 Fluent 的流体分析方法及求解过程

模型文件	网盘\Chapter12\char12−2\ fluid_FLUENT.x_t
结果文件	网盘\Chapter12\char12−2\fluid_FLUENT.wbpj

12.2.1 问题描述

某图 12−36 所示的三通道管道模型，模型的热流入口流速为 20m/s，温度为 500K，冷流入口速度为 10m/s，温度为 300K，出口为自由出口。

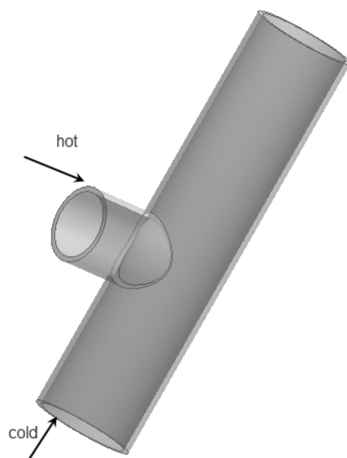


图 12−36 三通管道模型

12.2.2 软件启动与保存

Step1： 启动 Workbench。

Step2： 保存工程文档。进入 Workbench 后，单击工具栏中的 Save As...（另存为）按钮，将文件保存为 fluid_FLUENT，单击 Getting Started 窗口右上角的“关闭”按钮将其关闭。

12.2.3 导入几何数据文件

Step1： 创建几何生成器。在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Component Systems



中单击 Geometry 并按住左键不放，将其拖曳到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 Excel 表格的项目 A。

Step2： 右键单击 A2：Geometry 项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Browse 命令，选择 fluid_FLUENT.x_t 几何文件。

Step3： 双击 A2 进入几何建模环境，如图 12−37 所示，在几何建模平台中可以对几何进行修改，此案例不做修改。

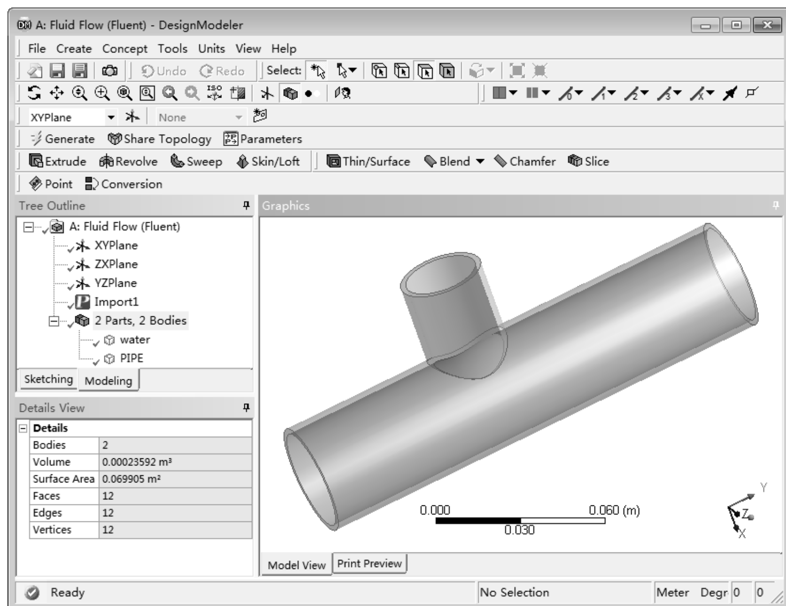


图 12−37　几何创建平台

Step4： 关闭 ANSYS SpaceClaim 几何建模平台，返回到 Workbench 平台。

12.2.4 网格设置

Step1： 选择 Toolbox 下面的 Analysis Systems→Fluid Flow（Fluent），并将其直接拖曳到 A2 栏中，如图 12−38 所示，创建基于 Fluent 求解器的流体分析环境。

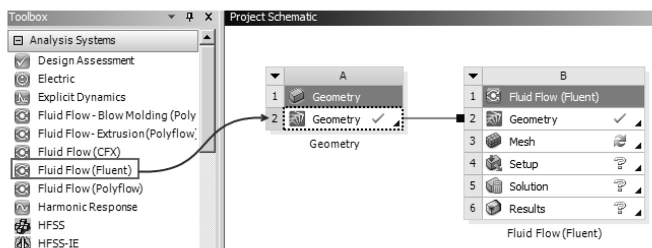


图 12−38　流体分析环境

Step2： 双击项目 B 中的 B3：Mesh 项，进入 Meshing 平台。在 Meshing 平台中可以进行网格划分操作。

Step3：右键依次选择 Outline→Project→Model（B3）→Geometry→PIPE 选项，在弹出的图 12-39 所示的快捷菜单中选择 Suppress Body 命令，将实体几何抑制掉。

注：由于流体分析时，除了流体模型外其他模型不参与计算，故做流体分析时需要把其抑制掉。

Step4：右键依次选择 Outline→Project→Model（B3）→Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Inflation 命令，如图 12-40 所示。

注：做流体分析之前，需要对流体几何进行网格划分，流体网格划分一般需要设置膨胀层。

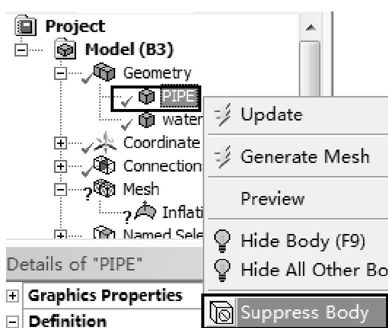


图 12-39 抑制几何

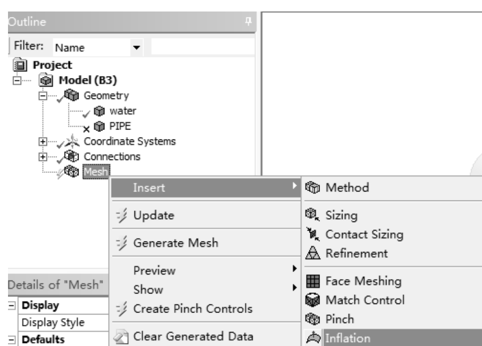


图 12-40 快捷菜单

Step5：在弹出的 Details of“Inflation”-Inflation（膨胀层设置）面板中进行如下设置：在 Geometry 栏中保证流体几何实体被选中；在 Boundary 栏中选择流体几何外表面（此处选择的圆柱面），其余默认即可，如图 12-41 所示。

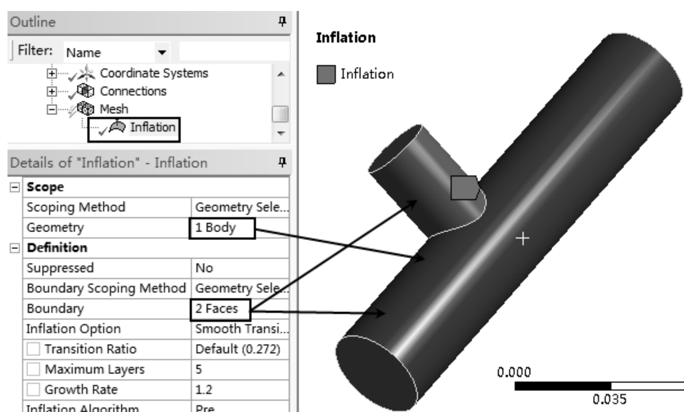


图 12-41 膨胀层设置

Step6：右键选择 Mesh 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分网格，划分完成后的网格模型如图 12-42 所示。

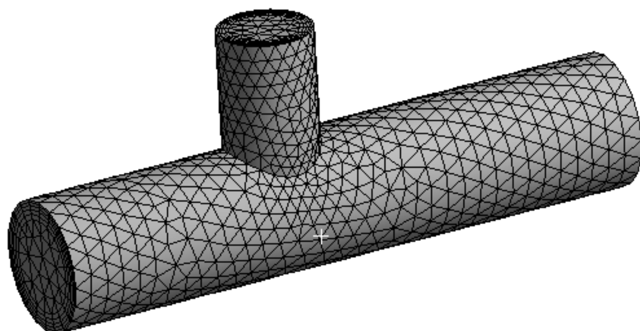


图 12−42　网格模型

Step7：端面命名。右键选择 Y 方向最大位置的一个圆柱端面，在弹出的图 12−43 所示的快捷菜单中选择 Create Named Selection 命令，在弹出的 Selection Name 对话框中输入 coolinlet，单击 OK 按钮。

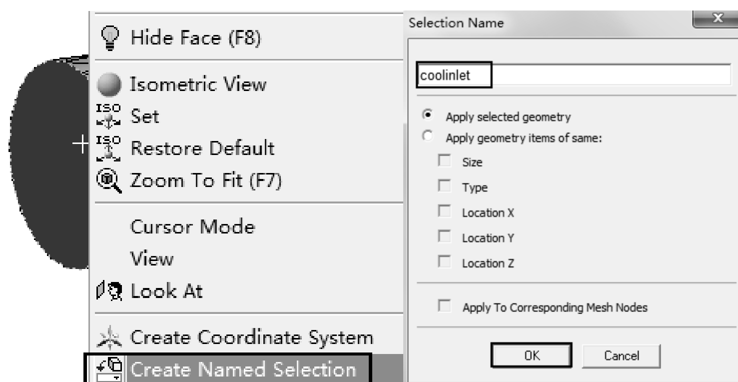


图 12−43　命名几何端面

Step8：端面命名。以同样的操作，将其他几何端面全部命名，如图 12−44 所示。

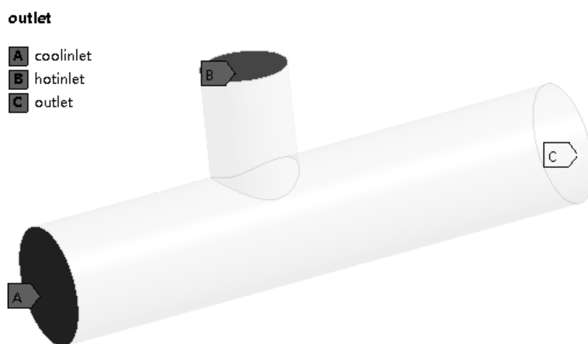


图 12−44　命名其他几何端面

Step9：网格设置完成后，关闭 Mechanical 网格划分平台，回到 Workbench 平台，右键选择 B3：Mesh 项，在弹出的快捷菜单中选择 Update 命令。

12.2.5 进入 Fluent 平台

Step1：Fluent 前处理操作。双击项目 B 中的 B4：Setup 项，此时弹出图 12-45 所示的 Fluent Launcher（Setting Editonly）启动设置对话框，保持对话框中的所有设置为默认，单击 OK 按钮。

注：Fluent 启动设置对话框中可以设置计算维度、计算精度，并进行处理器数量等的操作，本例仅仅为了演示。读者做实际工程时，需要根据实际需要进行选择，以保证计算精度。关于设置的问题，请读者参考帮助文档。

Step2：此时出现图 12-46 所示 Fluent 操作界面，在 Fluent 操作界面中可以完成本例的计算及一些简单的后处理。

Fluent 操作界面具有强大的流体动力学分析功能，由于篇幅有限，这里仅对流体中的简单流动进行分析，以让初学者对 Fluent 流体动力学分析有初步的认识。

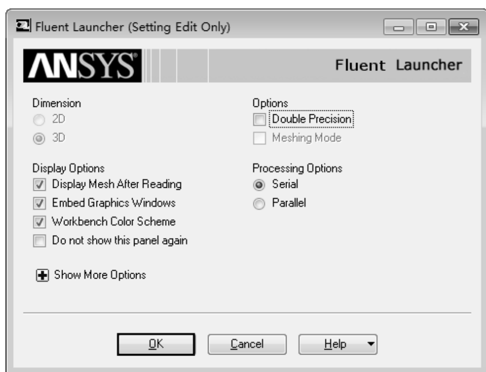


图 12-45 启动设置对话框

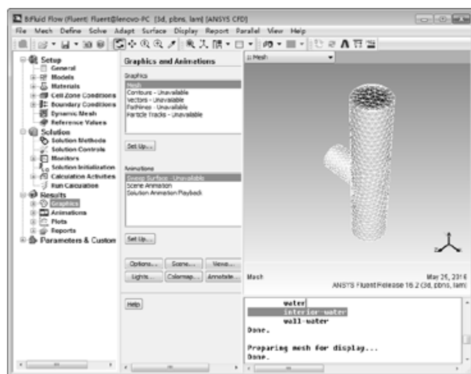


图 12-46 Fluent 操作界面

Step3：选择分析树中的 General 命令，在出现的 General 面板中单击 Check 按钮，此时在右下角的命令输入窗口中出现图 12-47 所示的命令行，检查最小体积是否出现负数。

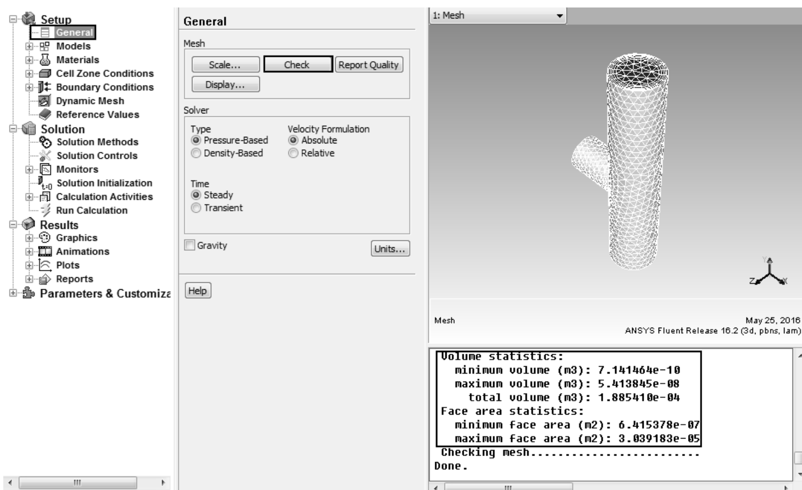


图 12-47 模型检查

在网格划分时，容易出现最小体积为负值的情况，在做流体计算时，需要对几何网格的大小进行检查，以免计算出错。

Step4：选择 Models 命令，在 Models 面板中双击 Viscous 命令，在弹出的图 12−48 所示的 Viscous Models 对话框中选择 K−epsilon（2eqn）选项，并单击 OK 按钮确认模型选择。

注：在做流体分析时，根据流体的流动特性，需要选择相应的流体动力学分析模型进行模拟，这里使用最简单的层流模型，此模型不一定适合实际的工程计算，本例只是为了演示功能。

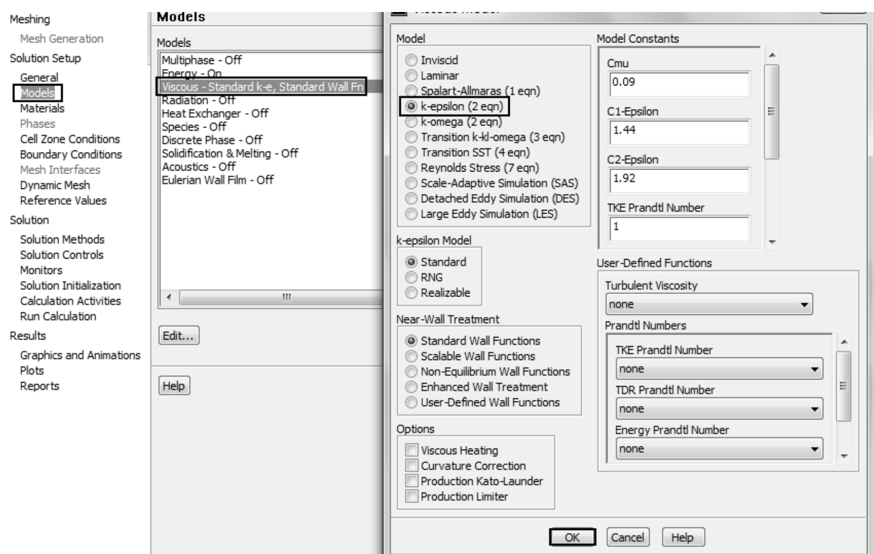


图 12−48　模型选择

Step5：选择 Models 命令，在 Models 面板中双击 Energy 命令，在弹出的图 12−49 所示的 Energy 对话框中勾选 Energy Equation 复选框，并单击 OK 按钮确认选择。

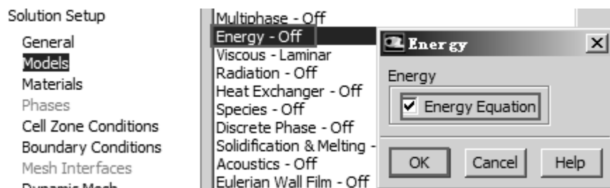


图 12−49　能量选项

12.2.6　材料选择

选择 Material 选项，在出现的 Materials 对话框中单击 Create/Edit 按钮，在弹出的对话框中单击 Fluent Database 按钮，在弹出的图 12−50 所示的对话框中选择 Water−liquid（h2o<1）选项。

注：此处使用液态水模拟，读者可以在材料库中选择其他流体材料进行模拟。另外，在这里，读者可以定义自己想要的材料或者修改一些材料的属性。

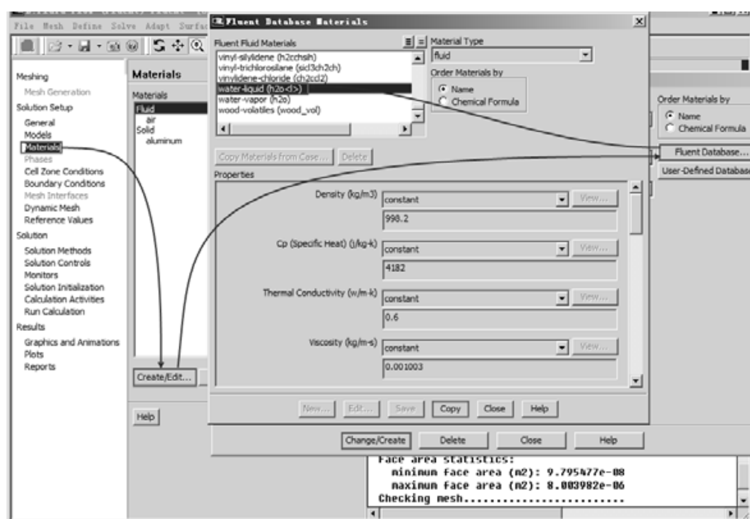


图 12−50 选择材料

12.2.7 设置几何属性

Step1： 设置几何属性。选择分析树中的 Cell Zone Conditions 命令，在 Cell Zone Conditions 面板的 Zone 栏中选择 water 几何名，然后将 Type 设置为 fluid，如图 12−51 所示。

Step2： 在弹出的图 12−52 所示的 Fluid 对话框中选择 Water−liquid 选项，单击 OK 按钮。

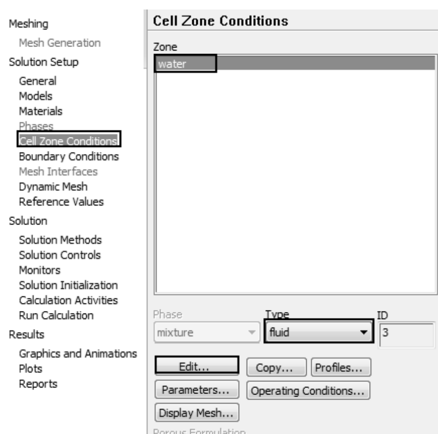


图 12−51 设置几何属性

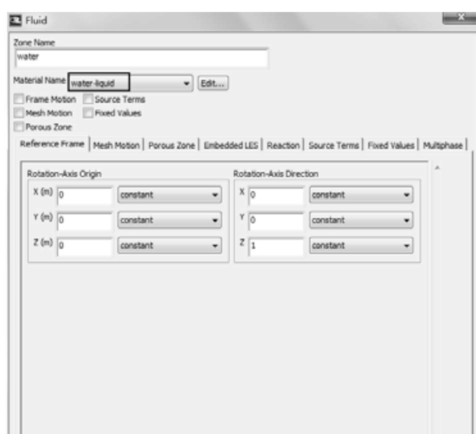


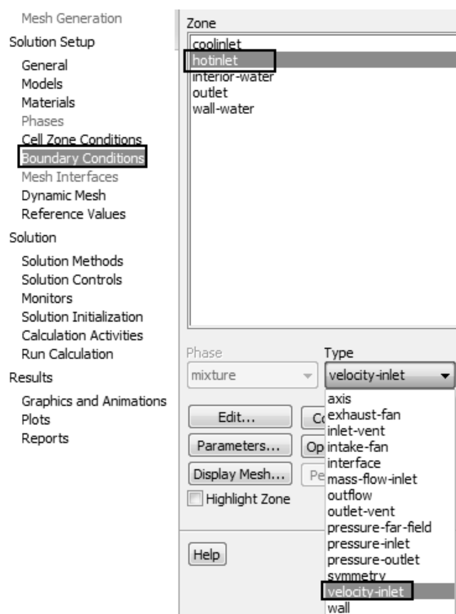
图 12−52 设置材料

12.2.8 流体边界条件

Step1： 选择命令树中的 Boundary 命令，在 Boundary Condition 面板的 Zone 中选择 hotinlet 选项，在图 12−53 所示的 Type 栏中选择 velocity-inlet 选项。

Step2： 设置入口速度。在弹出的图 12−54 所示的 Velocity-Inlet 对话框中作如下设置：在 Velocity Magnitude（m/s）栏中输入入口流速为 20m/s；在 Specification Method 栏中选择 Intensity and Viscosity Radio 选项；在 Turbulent Intensity（%）栏中输入 5；在 Turbulent Viscosity Radio 栏中输入 10；在 Thermal 选项卡中输入温度为 500K，并单击 OK 按钮。





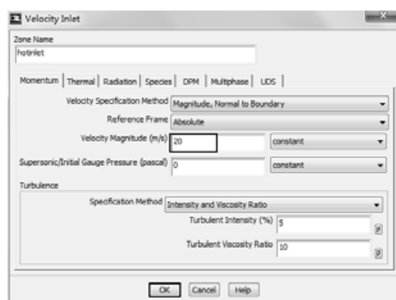
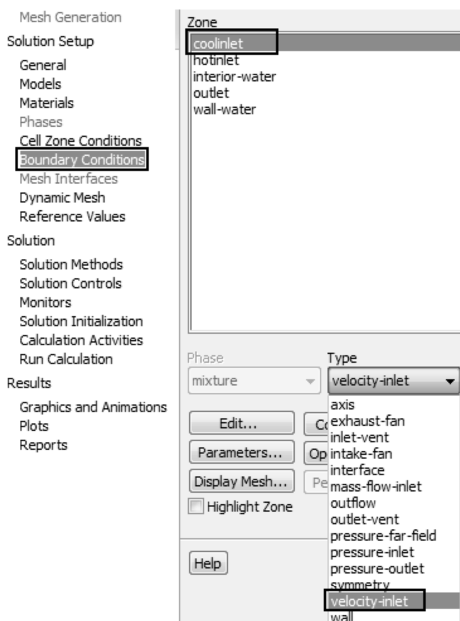


图 12-53　设置入口边界　　　　图 12-54　设置入口速度

Step3：选择分析树中的 Boundary 命令，在 Boundary Condition 面板的 Zone 中选择 coolinlet 选项，在图 12-55 所示的 Type 栏中选择 velocity-inlet 选项。

Step4：设置入口速度。在弹出的图 12-56 所示的 velocity-inlet 对话框中作如下设置：在 velocity Magnitude（m/s）栏中输入入口流速为 10m/s；在 Specification Method 栏中选择 Intensity and Viscosity Radio 选项；在 Turbulent Intensity（%）栏中输入 5，在 Turbulent Viscosity Radio 栏中输入 10；在 Thermal 选项卡中输入温度为 300K，并单击 OK 按钮。



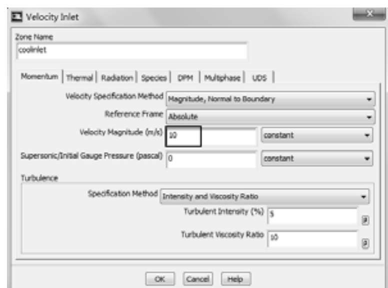


图 12-55　设置出口边界　　　　图 12-56　设置入口速度

Step5：设置 outlet 为 Pressure Outlet 属性，如图 12-57 所示，在属性框中保持所有参数默认即可。

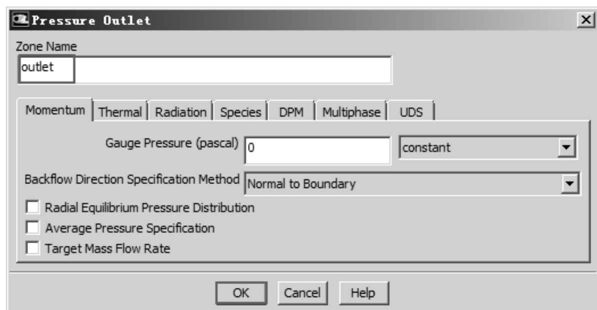


图 12-57　压力出口

12.2.9 求解器设置

Step1：选择分析树中的 Solution Initialization 命令，在如图 12-58 所示的操作面板中作如下操作：在 Initialization Methods 栏中选择 Standard Initialization 选项；在 Compute from 栏中选择 hotinlet 选项，其余默认即可，并单击 Initialize 按钮。

Step2：选择分析树中的 Run Solution 命令，在如图 12-59 所示的操作面板中作如下操作：在 Number of Iteratioins 栏中输入 500，其余保存默认即可，单击 Calculate 按钮。

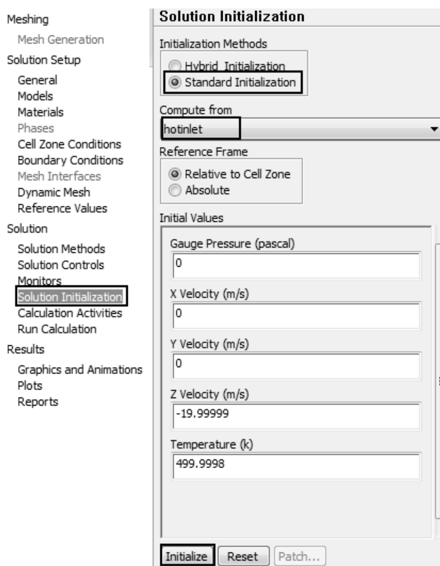


图 12-58　初始化

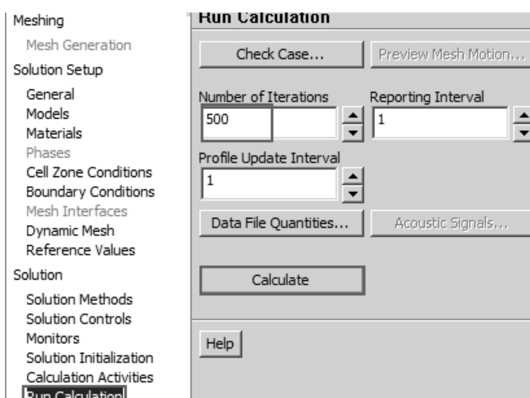


图 12-59　步长设置

Step3：图 12-60 所示为 Fluent 正在计算过程，图表显示了能量变化曲线与残差曲线，文本框显示了计算时迭代的过程与迭代步数。

Step4：求解完成后会出现图 12-61 所示的提示框，单击 OK 按钮确认。

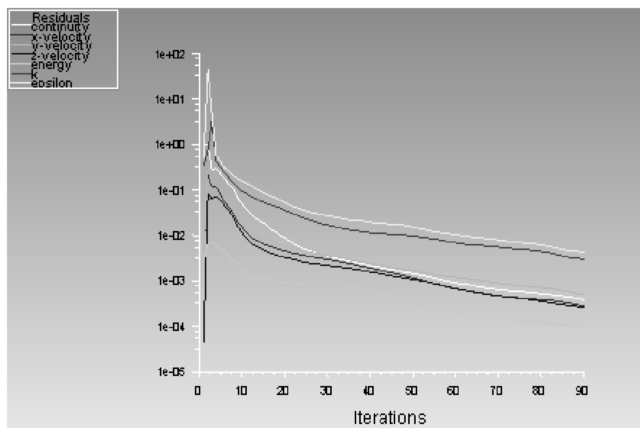
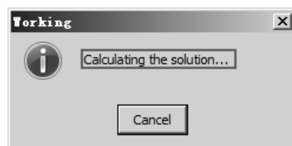


图 12-60　求解计算



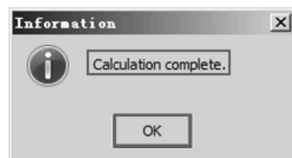


图 12-61　提示框

12.2.10 结果后处理

Step1：后处理操作。选择分析树中的 Results→Graphics→Contours，如图 12-62 所示，双击 Contours 选项。

Step2：弹出图 12-63 所示的 Contours 对话框中作如下操作：在 Contours of 栏中选择 Velocity；在 Surfaces 栏中单击按钮，选择所有边界；其余保持默认即可，并单击 Display 按钮。

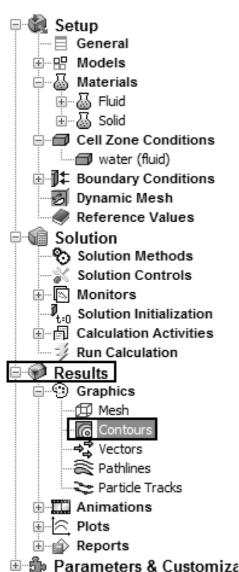


图 12-62　后处理命令

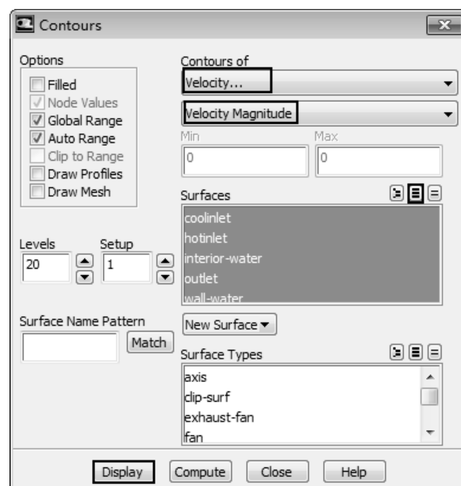


图 12-63　后处理操作

Step3：图 12-64 所示为流速分布云图，从图中可以看出，粗管流速的变化受到三个细管的影响较大。

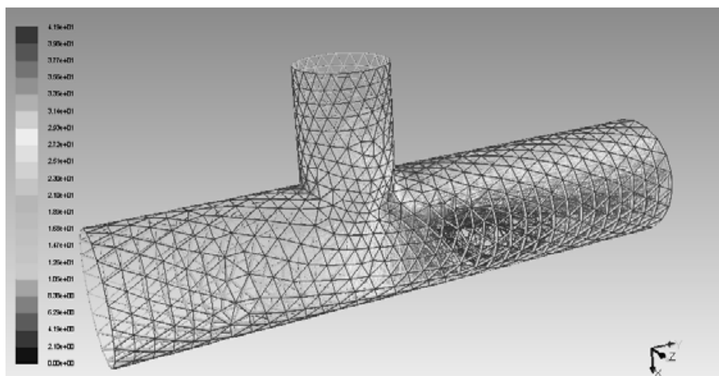


图 12−64 流速云图

Step4：后处理操作。选择分析树中的 Results→Graphics→Vectors，如图 12−65 所示，双击 Vectors 选项。

Step5：在如图 12−66 所示的 Vectors 对话框中作如下操作：在 Contours of 栏中选择 Velocity；在 Surfaces 栏中单击▤按钮，选择所有边界；其余保持默认即可，并单击 Display 按钮。

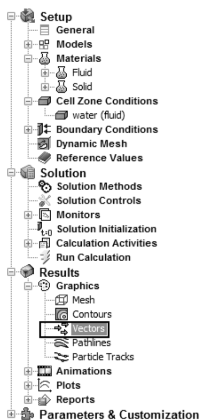


图 12−65 后处理命令

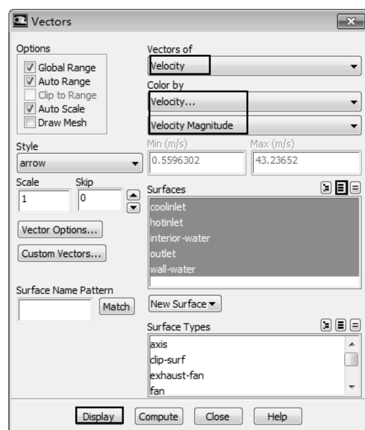


图 12−66 后处理操作

Step6：图 12−67 所示为流速矢量云图，箭头的大小表示速度的大小。

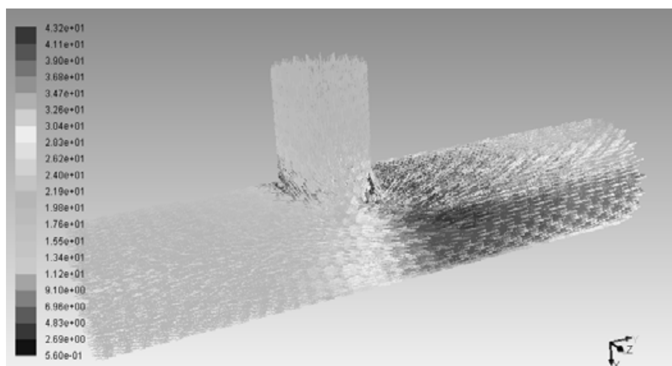


图 12−67 流速矢量云图

Step7：重复以上操作，温度场矢量云图如图 12-68 所示。

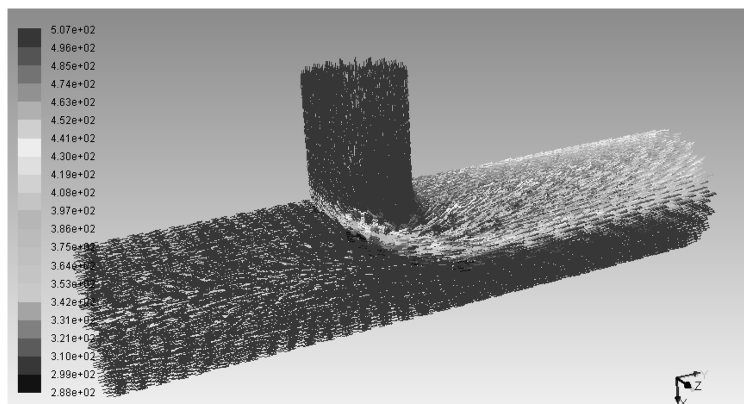


图 12-68　温度矢量云图

Step8：关闭 Fluent 平台。

12.2.11 POST 后处理

Step1：双击 B6 进入到 POST 后处理平台，如图 12-69 所示，POST 后处理平台专业强、处理效果好，同时操作简单，适合初学者。

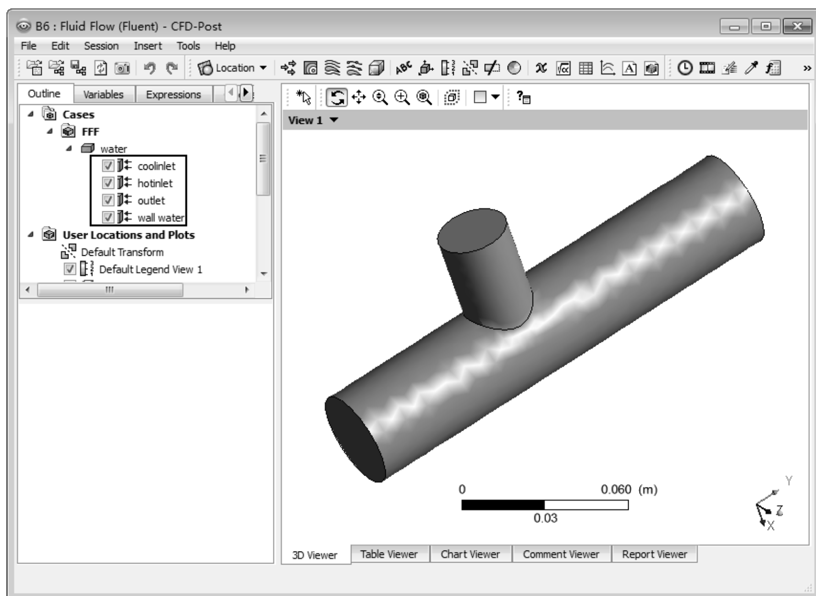


图 12-69　POST 后处理平台

Step2：在工具栏中选择命令，在弹出的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step3：在图 12-70 所示的 Details of Streamline 1 面板中的 Start From 栏中选择 coolinlet，hotinlet，其余默认，单击 Apply 按钮。

Step4：图 12-71 所示为流体流速迹线图。

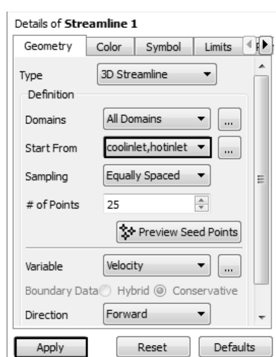


图 12-70 设置流迹线

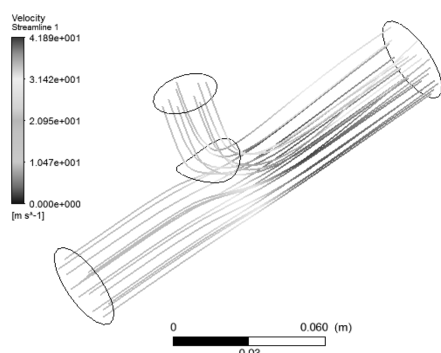


图 12-71 流迹线云图

Step5：在工具栏中选择命令，在弹出的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step6：在图 12-72 所示的 Details of Contour 1 面板中的 Variable 栏中选择 Temperature 项，其余默认，单击 Apply 按钮。

Step7：图 12-73 所示为流体温度场分布云图。

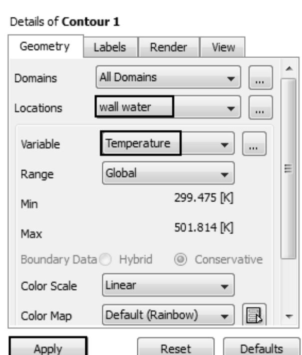


图 12-72 设置温度云图

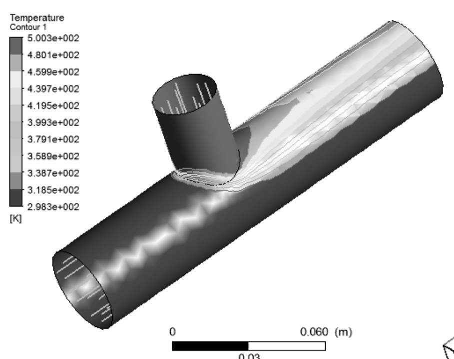


图 12-73 温度场分布云图

Step8：图 12-74 所示为流体压力分布云图。

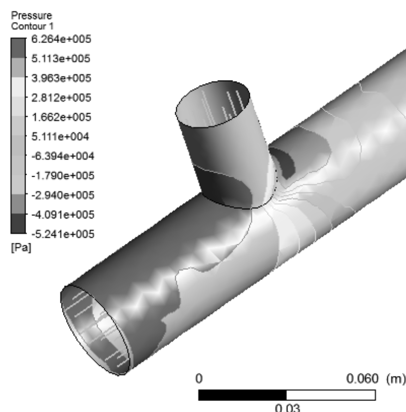


图 12-74 压力分布云图

Step9：单击工具栏中的 Location 按钮，选择下面的 Plane 命令，创建一个平面在 YZ 面上，单击 OK 按钮，选择 Contour 选项，在 Details of Contour 1 面板中的 Locations 栏中选择刚刚建立的平面，单击 Apply 按钮，如图 12−75 所示。

Step10：此时显示图 12−76 所示的在平面上的压力分布云图。

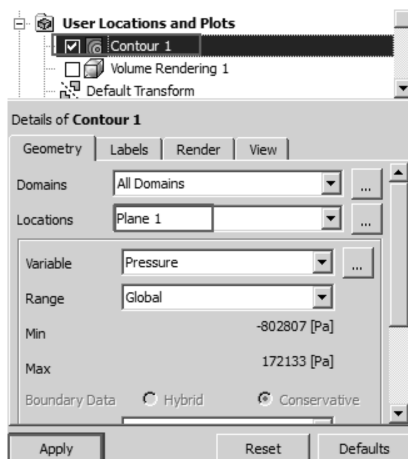


图 12−75　设置压力云图

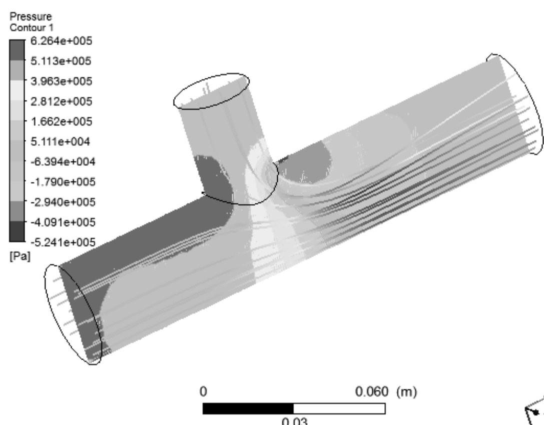


图 12−76　压力分布云图

注：对比 POST 后处理与 Fluent 后处理可以看出，前者的后处理能力要强于后者，而且操作更简单。

Step11：返回到 Workbench 窗口，单击 Save（保存）按钮保存文件，然后单击按钮退出。

12.3　流体动力学实例三——Icepak 流场分析

Icepak 是强大的 CAE 仿真工具，它能够对电子产品的传热和流动进行模拟，从而提高产品的质量，大大缩短产品的上市时间。Icepak 能够处理部件级、板级和系统级问题，帮助工程师完成无法通过实验进行的计算，并监控到无法测量的位置的数据。

Icepak 采用的是 Fluent 计算流体力学求解器。该求解器能够完成灵活的网格划分，利用非结构化网格求解复杂几何问题，且多点离散求解算法能够加速求解时间。

Icepak 拥有其他商用软件不具备的特点，包括：

- 非矩形设备的精确模拟。
- 接触热阻模拟。
- 各向异性导热率。
- 非线性风扇曲线。
- 集中参数散热器。
- 辐射角系数的自动计算。

Icepak 软件包含以下内容：



（1）强大的几何建模工具

Icepak 软件本身拥有强大的几何建模工具，其建模方式分为以下几种类型。

- 基于对象的建模：主要有 cabinets 机柜、networks 网络模型、heat exchangers 热交换器、wires 线、openings 开孔、grilles 过滤网、sources 热源、printed circuit boards（PCBs）PCB 板、enclosures 腔体、plates 板、walls 壁、blocks 块、fans（with hubs）风扇、blowers 离心风机、resistances 阻尼、heat sinks 散热器、packages 封装等。
- 基于 macros 宏的建模：主要有 JEDEC test chambers JEDEC 试验室、printed circuit boards（PCB）、ducts 管道、compact models for heat sinks 简化的散热器等。
- 二维模型：主要有 rectangular 矩形、circular 圆形、inclined 斜板、polygon 多边形板。
- 三维模型：主要有 prisms 四面体、cylinders 圆柱、ellipsoids 椭圆柱、prisms of polygonal and varying cross-section 多面体、ducts of arbitrary cross-section 任意形状的管道等。

除此之外，Icepak 还支持从第三方几何建模软件中导入几何模型，也可以从第三方 CAE 软件中导入网格模型，还支持中间格式（如 IGES、STEP、IDF 和 DXF 等）数据的直接导入。

（2）网格划分功能

Icepak 采用的是自动非结构化网格，可以生成六面体、四面体、五面体及混合网格，同时也可以控制粗网格的生成、细网格的生成、非连续网格的生成等，并有强大的网格检查工具对网格进行检测。

（3）丰富的材料库

Icepak 具有丰富的材料库，材料库中包含各向异性材料、属性随温度变化的材料等。

（4）丰富的物理模型

与 CFX 和 Fluent 软件一样，Icepak 也具有丰富的物理模型，用于模拟不同工况的流动，其中包括层流/湍流模型、稳态/瞬态分析、强迫对流/自然对流/混合对流、传导、流固耦合、辐射、体积阻力、接触阻尼、非线性风扇曲线，以及集中参数的 Fans，Resistances 和 Grilles 等，其中湍流模型主要有混合长度方程（0−方程）、双方程（标准 k−ε 方程）、DNG k−ε、增强双方程（标准 k−ε 方程带有增强壁面处理）及 Spalart−Allmaras 湍流模型。

（5）边界条件

Icepak 有以下几种边界条件类型：壁和表面边界条件，包括热流密度、温度、传热系数、辐射和对称边界条件；开孔和过滤网；风扇；热交换器；时间相关和温度相关的热源；随时间变化的环境温度。

（6）强大的求解器

Icepak 内核利用 Fluent 求解器采用有限体积的求解算法，其算法具有如下特点：使用多重网格算法来缩短求解时间；选择一阶迎风格式做为初始计算，再使用高阶迎风格式来提高计算精度。

（7）可视化后处理

包括 3D 建模和后处理；可视化速度向量、云图、粒子、网格、切面和等值面；点跟踪和 XY 图表；速度、温度、压力、热流密度、传热系数、热流、湍流参数等云图；速度、温度、压力最大值；迹线动画；瞬态动画；切面动画；输出为 AVI、MPEG、FLI 及 GIF 格式。

Icepak 具有广泛的工程应用领域，包括计算机机箱、通信设备、芯片封装和 PCB 板、系统模拟、散热器、数字风洞及热管模拟等。

本节主要介绍 ANSYS Workbench 17.0 的流体分析模块——Icepak 的流体结构方法及求解过程，计算流场及温度分布情况。

学习目标：

熟练掌握 Icepak 的流体分析方法及求解过程；熟练掌握 CFD-Post 在 Workbench 平台的处理方法

注：本算例仅仅对操作过程进行详细介绍，请读者根据产品的实际情况对材料进行详细设置，以免影响计算精度。

模型文件	网盘\Chapter18\char12−3\ graphics_card_simple.stp
结果文件	网盘\Chapter18\char12−3\ ice_wb.wbpj

12.3.1 问题描述

图 12−77 所示的 PCB 板模型，板上装有电容器、存储卡等，试分析 PCB 板的热流云图。

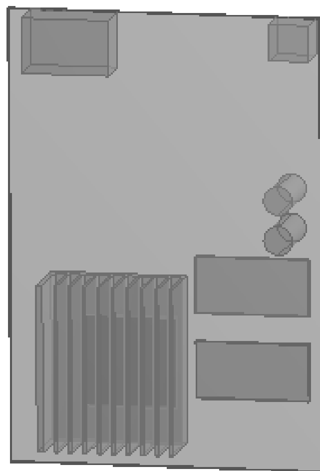


图 12−77　PCB 模型

12.3.2 软件启动与保存

Step1：启动 Workbench。

Step2：保存工程文档。进入 Workbench 后，单击工具栏中的 Save As...（另存为）按钮，将文件保存为 ice_wb.wbpj，单击 Getting Started 窗口右上角的“关闭”按钮将其关闭。

12.3.3 导入几何数据文件

Step1：从工具箱中的 Components 下面添加一个 Geometry 项目到项目管理窗口中。右键选择 A2 栏，在弹出的对话框中依次选择 Import Geometry→Browse 命令，再在弹出的对话框中选择 graphics_card_simple.stp 文件，如图 12−78 所示，单击“打开”按钮。

Step2：双击 A2：Geometry 项进入到图 12−79 所示的几何建模平台，在弹出的单位设置对话框中选择单位为 m，单击 OK 按钮，选择工具栏中的 Generate 命令生成几何模型。

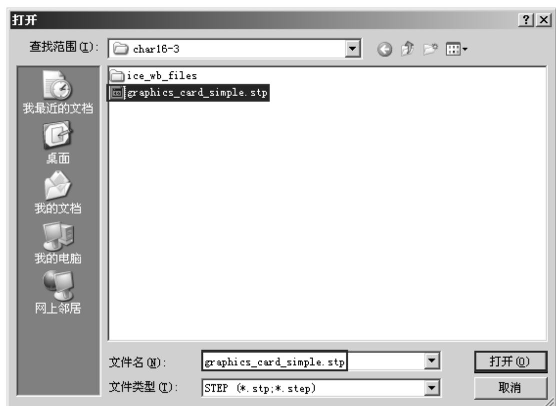


图 12-78 对话框

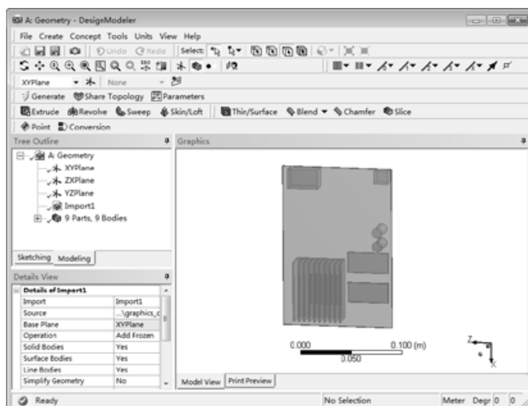


图 12-79 DM 平台

Step3： 依次选择菜单 Tools→Electronics，在弹出的如图 12-80 所示的窗口中作如下操作：在 Simlification Type 栏中选择 Level 2 选项；在 Select Bodies 栏中确保所有几何全部选中，选择工具栏中的 Generate 命令。

Step4： 此时几何模型如图 12-81 所示。

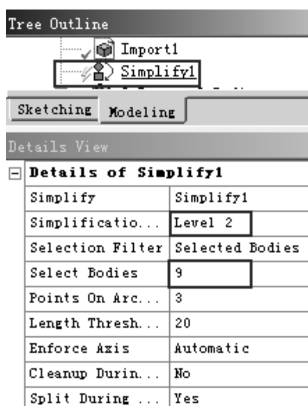


图 12-80 窗口

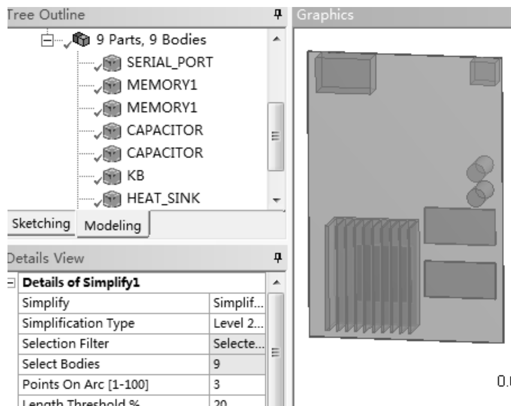


图 12-81 几何模型

Step5： 关闭 DesignModeler 几何建模平台，返回到 Workbench 平台。

12.3.4 添加 Icepak 模块

Step1： 选择 Toolbox 下面 Components Systems→Icepak，并将其直接拖曳到 A2 栏中，如图 12-82 所示，创建基于 Icepak 求解器的流体分析环境。

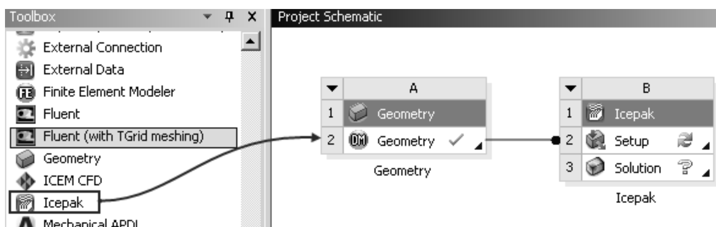


图 12-82 流体分析环境



Step2：双击项目 B 中的 B2：Setup 项，进入图 12-83 所示的 Icepak 窗口。在 Icepak 平台可以进行网格划分，材料添加及后处理等操作。

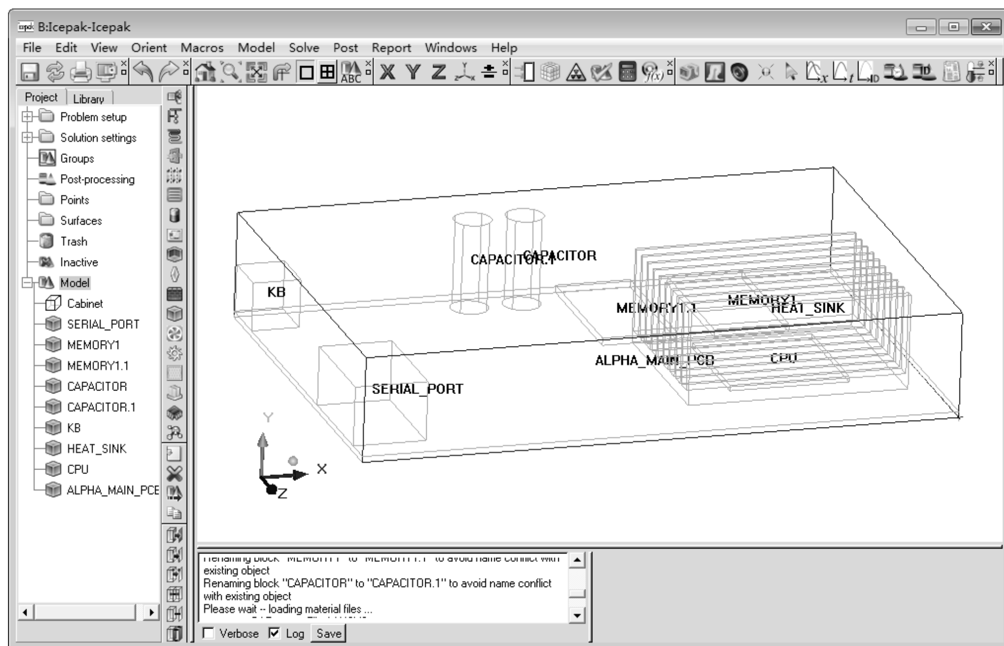


图 12-83　Icepak 窗口

Step3：在左侧 Project 选项卡中，依次选择 Model→Cabinet 选项，在右下角出现图 12-84 所示的对话框中作如下设置：在 Shape 栏中选择 Prism 选项；在 xS 栏中输入-0.19，单位选择 m；在 xE 栏中输入 0.03，单位选择 m；在 zS 栏中输入-0.11，单位选择 m；在 yE 栏中输入 0.028487，单位选择 m；在 zE 栏中输入 1e-006，单位选择 m，并单击 Apply 按钮完成几何尺寸的输入。

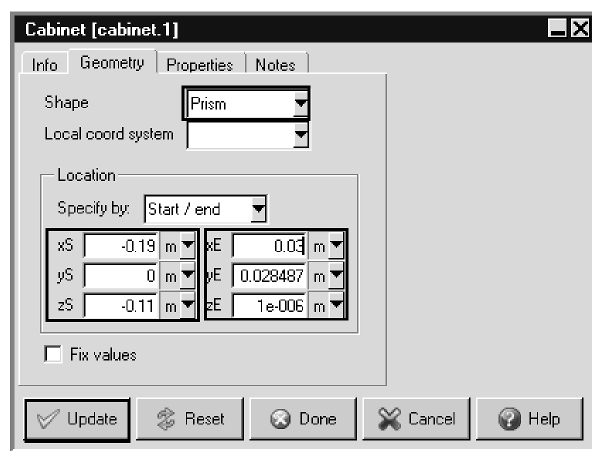


图 12-84　输入尺寸

注：由于流体分析时，除了流体模型外其他模型不参与计算，故做流体分析时需要把其抑制掉。

Step4： 单击 Edit 按钮，弹出图 12-85 所示的对话框，设置 Min x 和 Max x 的 Wall type 属性为 Opening。

Step5： 单击 Max x 栏的 Edit 按钮，在弹出的图 12-86 所示的对话框中单击 Properties 选项卡，并勾选 X Velocity 复选框，在后面输入速度为-0.001，单位为 m/s，单击 Update 按钮。

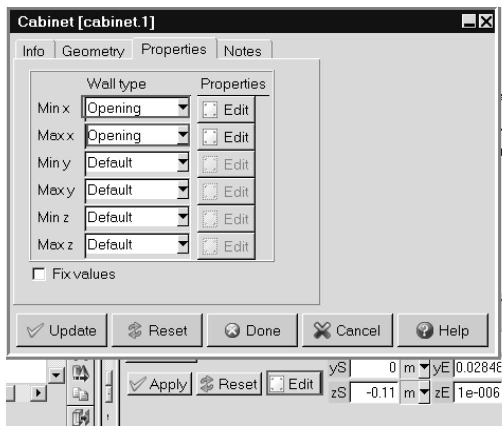


图 12-85 属性设置

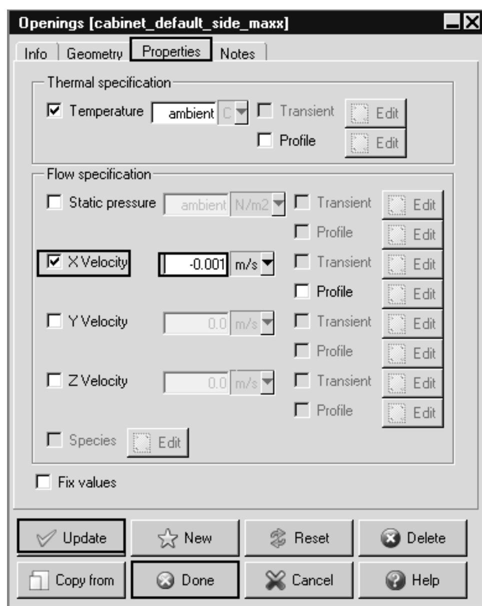


图 12-86 速度设置

Step6： 创建装配体。单击工具栏中的按钮，在弹出窗口中的 Name 栏中输入名称为 CPU_assembly，将 HEAT_SINK 和 CPU 两个几何添加到 CPU_assembly 中，单击 Apply 按钮，如图 12-87 所示。

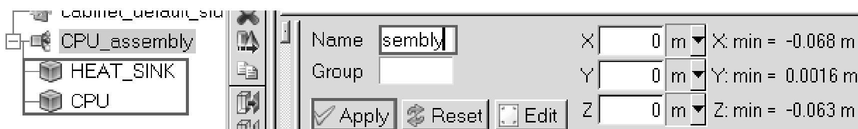


图 12-87 设置

Step7： 单击工具栏中的按钮，在弹出的对话框的 Settings 选项卡作如下操作：在 Mesh type 栏中选择 Mesher-HD 选项，单位设置为 mm；在 Max element size 栏中输入 X=7，Y=1，Z=3；在 Minimum gap 栏中输入 X=1，Y=0.16，Z=1，单位均设置为 mm；勾选 Set uniform mesh params 复选框，如图 12-88 所示。

Step8： 单击 Generate 按钮进行网格划分，划分完成后切换到 Display 选项卡，如图 12-89

所示，在选项卡中作如下输入：在最上端显示了单元数量和节点数量；勾选 Display mesh 复选框；

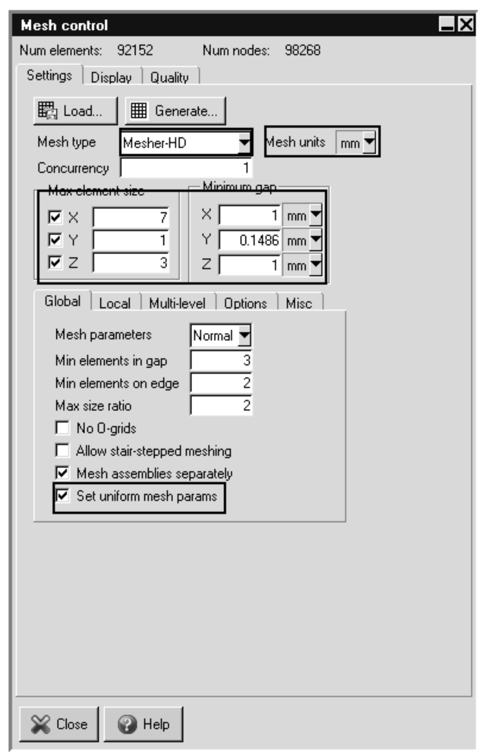


图 12-88　网格设置

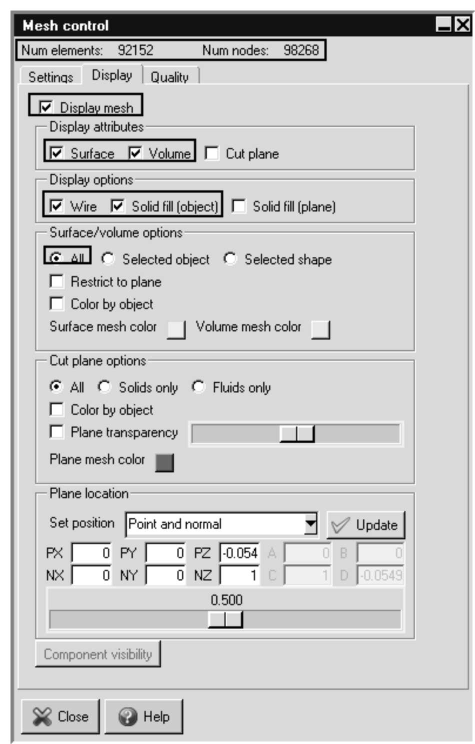


图 12-89　显示网格设置

在 Display attributes 栏中保证前两个复选框被勾选；在 Display options 栏中勾选前两个复选框，此时模型将显示图 12-90 所示的网格。

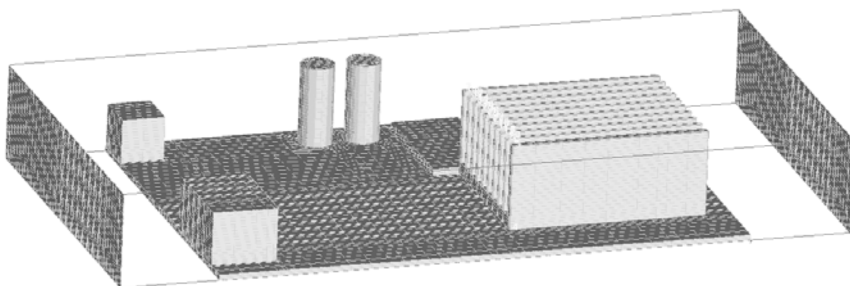


图 12-90　网格模型

Step9：切换到 Quality 选项卡，选择 Volume 单选按钮，此时将出现网格体积柱状图，如图 12-91 所示。

Step10：保持在 Quality 选项卡，选择 Skewness 单选按钮，此时将出现网格扭曲柱状图，如图 12-92 所示。

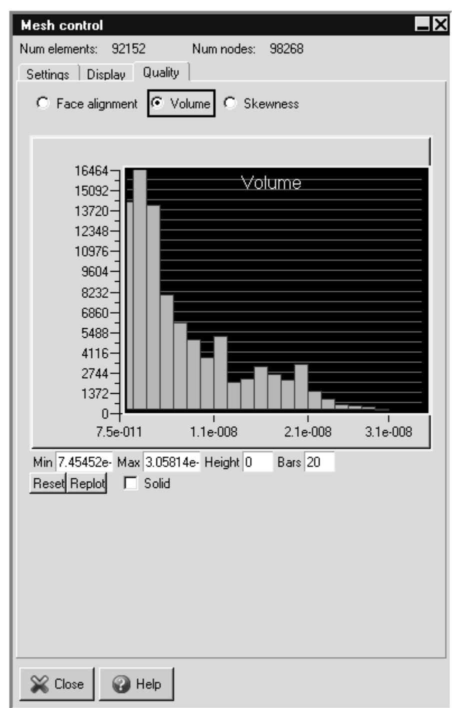


图 12-91 体积柱状图

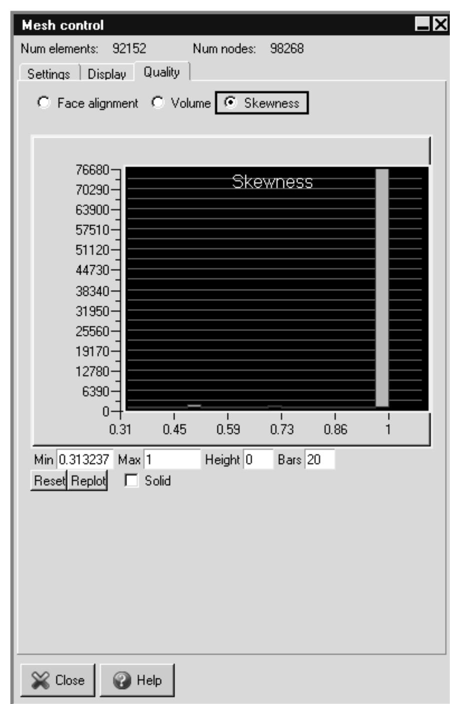


图 12-92 扭曲柱状图

12.3.5 热源设置

在分析树的 Project 选项卡中双击 CPU 选项，在弹出的图 12-93 所示的设置对话框中作如下设置：在 Properties 选项卡的 Solid Material 栏中选择 Ceramic_material 选项；在 Total power 栏中输入 60，单击 Done 按钮。

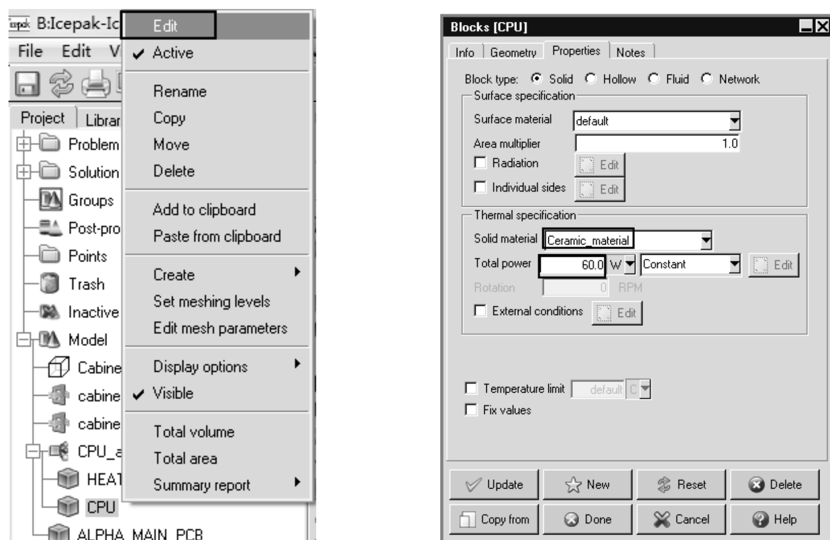


图 12-93 热源

右键选择 CPU，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令也可以完成同样操作。

12.3.6 求解分析

Step1：在 Project 选项卡中，双击 Problem setup 下面的 Basic parameters 选项，在弹出的图 12−94 所示的设置对话框的 General Setup 选项卡中作如下设置：勾选 Variables solved 中的 Flow（Velocity/Pressure）和 Temperature 两个复选框；保证 Radiation 为 On；在 Flow regime 中选中 Turbulent 单选按钮，并选择 Zero equation 选项；勾选 Gravity 复选框，并将 X 方向的重力加速度设置为−9.80665。

单击 Radiation 栏中的 Option 按钮，在弹出的如图 12−95 所示的对话框中作如下操作：

在 Include objects 栏中单击 All 按钮，在 Participating objects 栏中单击 All 按钮，再单击 Compute 按钮，进行角系数的计算，计算完成后，关闭对话框。

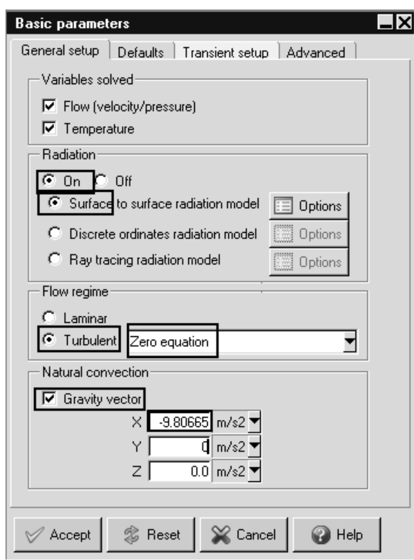


图 12−94　一般设置

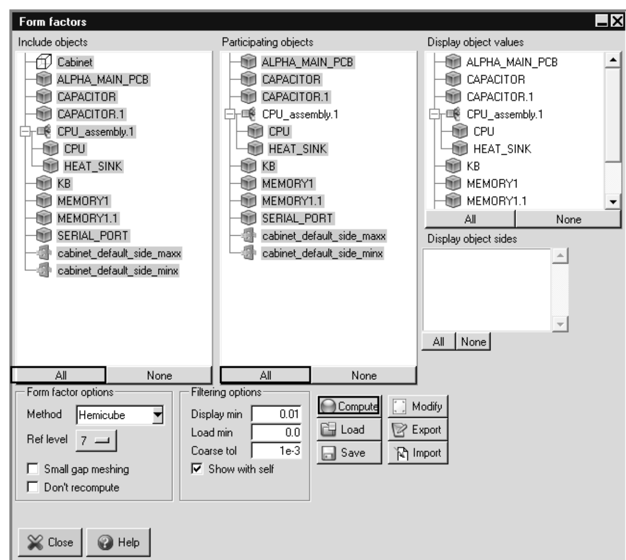


图 12−95　角系数计算

Step2：在 Project 选项卡中，双击 Solution settings 下面的 Basic settings 选项，在弹出的 Basic Settings 设置对话框中作如下设置：在 Flow 栏中输入 0.001；在 Energy 栏中输入 1e−7；在 Joule heating 栏中输入 1e−7，并单击 Accept 按钮。

双击 Solution settings 下面的 Advanced settings 选项，在弹出 Advanced Solver Setup 对话框中作如下设置：在 Pressure 栏中输入 0.7；在 Momentum 栏中输入 0.3，单击 Accept 按钮，如图 12−96 所示。

Step3：依次选择菜单栏 Solve→Run Solution，弹出图 12−97 所示的对话框，直接单击 Start solution 按钮进行计算，计算过程中将出现图 12−98 所示的残差跟踪窗口。

在网格划分时，容易出现最小体积为负值的情况，在做流体计算时，需要对几何网格的大小进行检查，以免计算出错。

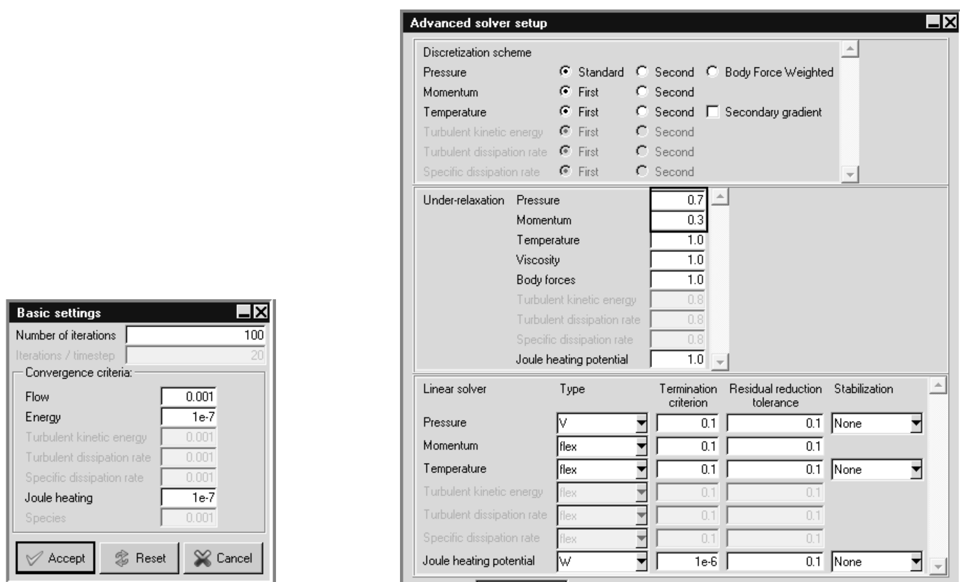
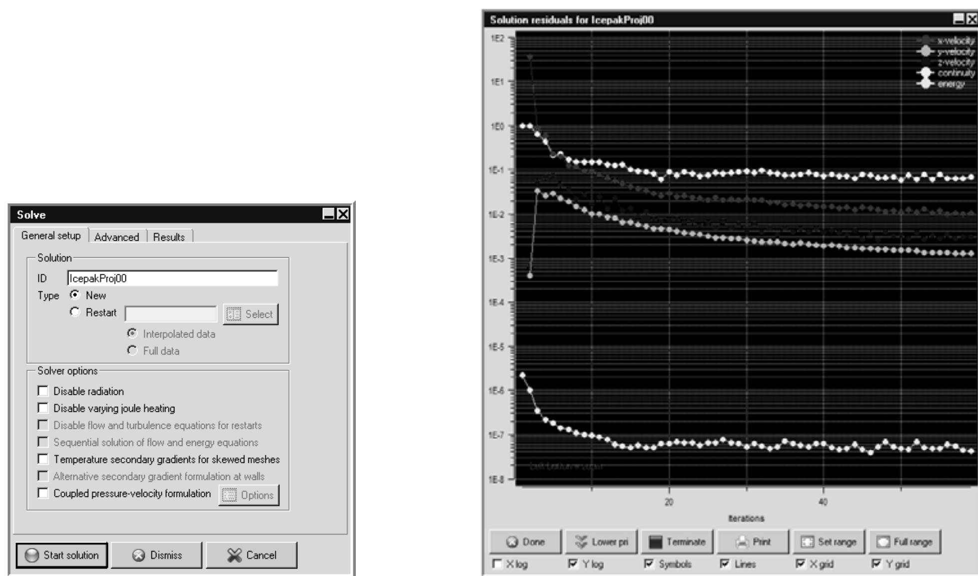


图 12-96 求解设置



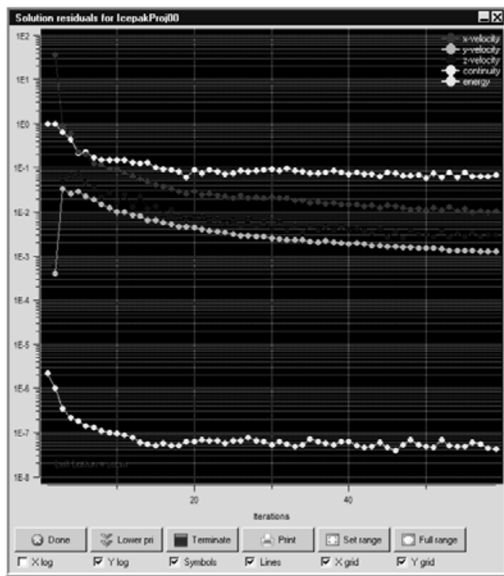


图 12-97 求解 图 12-98 残差跟踪窗口

Step4：计算完成后，返回到 Workbench 平台，在平台中添加一个 Results，如图 12-99 所示。

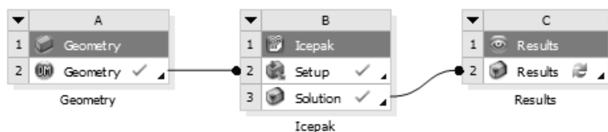


图 12-99 添加后处理

12.3.7 POST 后处理

Step1：双击 C2 栏进入到 POST 后处理平台，如图 12-100 所示。

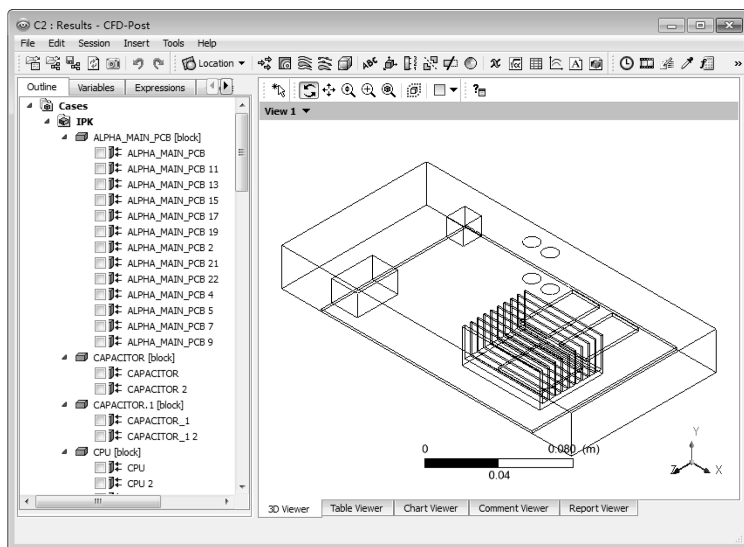


图 12-100 POST 后处理平台

Step2：在工具栏中选择命令，在弹出的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step3：在图 12-101 所示的 Details of Streamline 1 面板的 Start From 栏中选择 Cabinet，其余默认，单击 Apply 按钮。

Step4：图 12-102 所示为流体流速迹线图。

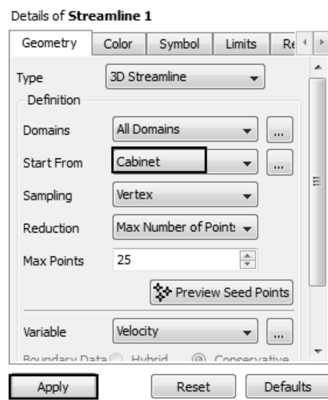


图 12-101 设置流迹线

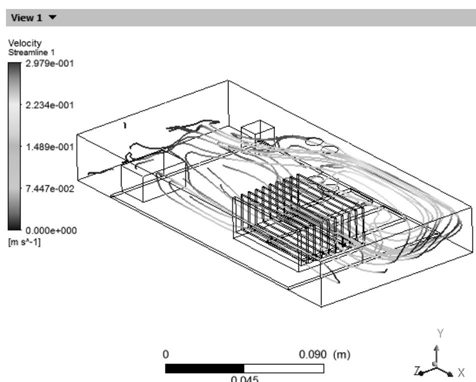


图 12-102 流速迹线云图

Step5：在工具栏中选择命令，在弹出的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step6：在图 12-103 所示的 Details of Contour 1 面板中的 Location 栏中单击右侧的按钮，在弹出的 Location Selector 对话框中选择 Cabinet 下面的所有几何名称并单击 OK 按钮，然后再单击 Details of Contour 1 面板中的 Apply 按钮。

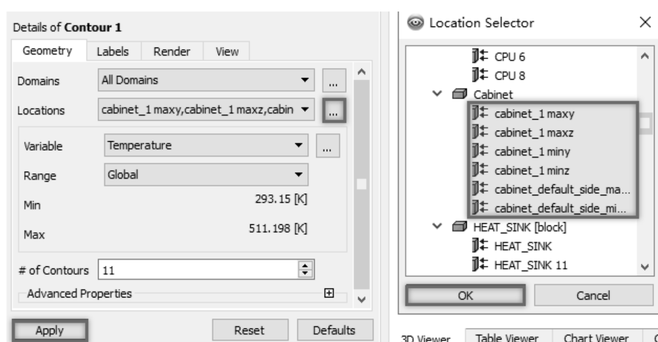


图 12-103 设置云图

Step7：图 12-104 所示为流体流速迹线图。

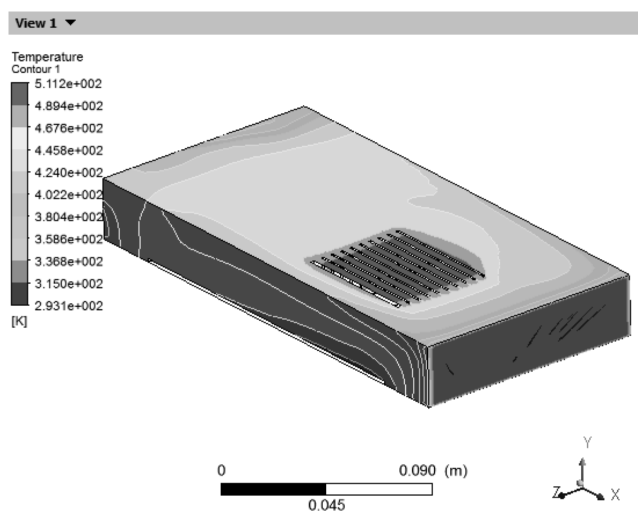


图 12-104 流体流速迹线图

12.3.8 静态力学分析

Step1：添加一个静态力学分析模块，如图 12-105 所示。

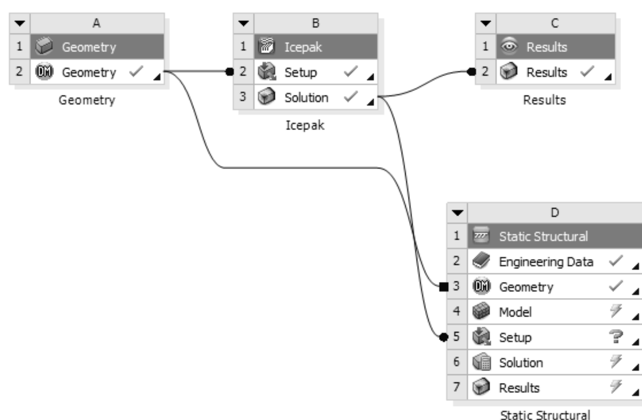


图 12-105 静力分析模块



Step2：右键选择 Mesh，划分网格，如图 12−106 所示。

Step3：右键选择 Import Load Solution，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Body Temperature 命令，如图 12−107 所示。

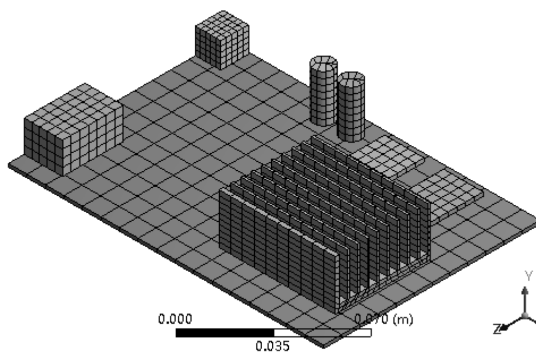


图 12−106　划分网格

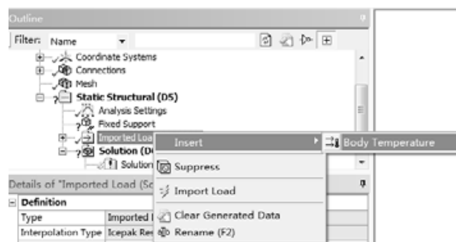


图 12−107　快捷菜单

Step4：在 Import Load Solution 设置窗口中作如下设置：Geometry 栏中选中所有几何实体，如图 12−108 所示。

Step5：选择工具栏中的 Generate 命令，此时温度分布云图如图 12−109 所示。

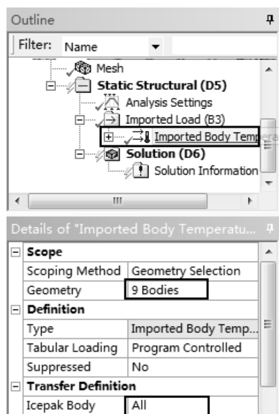


图 12−108　设置

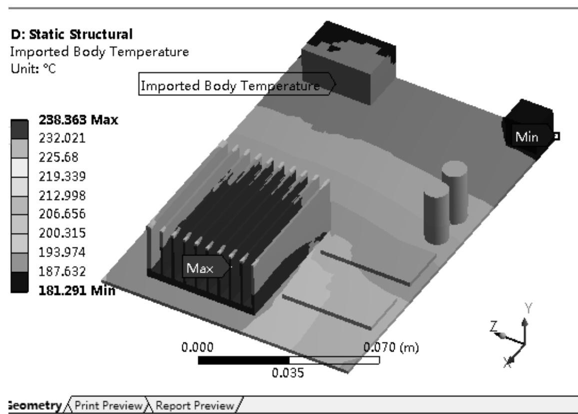


图 12−109　温度分布云图

Step6：将 PCB 板下端面固定，如图 12−110 所示，选择工具栏中的 Solve 命令进行计算。

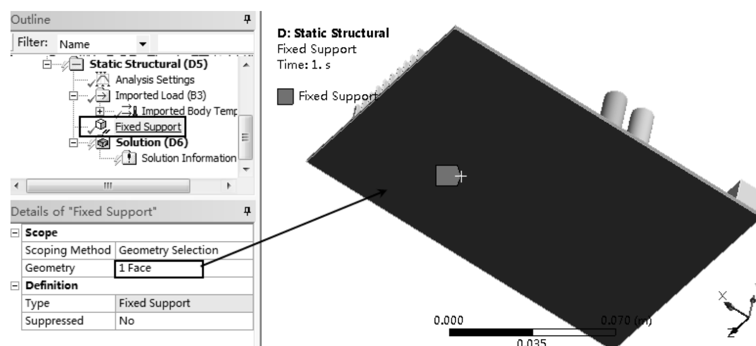


图 12−110　固定

Step7：热变形如图 12−111 所示，热应力如图 12−112 所示。

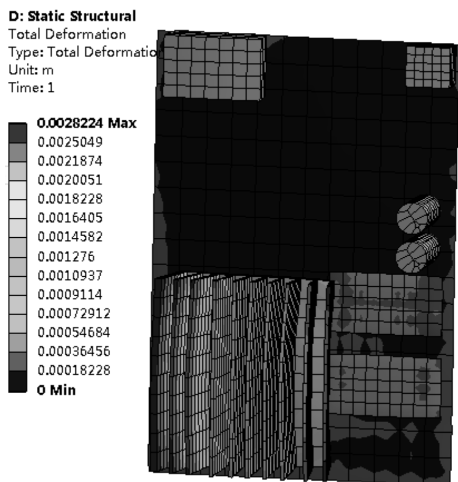


图 12−111　热变形

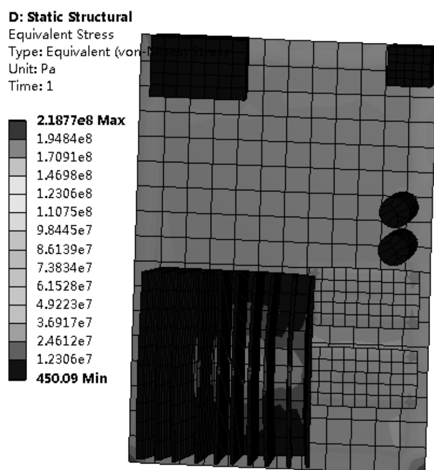


图 12−112　热应力

Step8：返回到 Workbench 窗口，单击 Save（保存）按钮保存文件，然后单击（关闭）按钮退出。

12.4　本章小结

本章介绍了 ANSYS CFX、ANSYS Fluent 及 ANSYS Icepak 模块的流体动力学分析功能，通过三个典型算例详细介绍了 ANSYS CFX、ANSYS Fluent 及 ANSYS Icepak 三种软件流体动力学分析的一般步骤，其中包括几何模型的导入、网格剖分、求解器设置、求解计算及后处理等操作方法。通过本章节的学习，读者应该对流体动力学的过程有详细的了解。

第 13 章 磁热耦合分析

磁热耦合的主要应用领域是感应加热。感应加热的原理是利用电磁感应使被加热的材料内部产生涡流，依靠涡流能量而加热。感应加热具有加热时间短、效率高和结构紧凑等优点，广泛应用于金属熔炼、热处理、焊接和液体加热等方面。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
磁热耦合分析的基本概念	√	√		
磁热耦合分析操作方法		√	√	√
磁热耦合分析的应用领域		√	√	√

13.1 磁热耦合概述

目前，对感应加热的磁热研究主要有：研究磁性和非磁性材料的横向磁通感应加热电磁场，建立模型描述磁场强度的分布，研究感应淬火问题；当材料表层加热到居里点特性变化时，通过假设工件由不同磁导率的两部分材料组成，来计算电磁场的分布；使用有限元法或者边界元法计算线性阻抗材料高频感应淬火的涡流场，分析表面感应淬火的残余应力分布等。

感应加热主要遵循电磁感应、肌肤效应和热传导等基本原理，其中电磁感应起主导作用，肌肤效应是影响感应加热的重要因素，它们在一定程度上决定了热传导，实际上，热传导所需的能量是由电磁感应涡流功率提供的。

电磁场计算根据边界条件求解麦克斯韦方程组，其中，磁场边界条件可以分为三类：①磁力线与边界面垂直；②磁力线与边界面平行；③边界面为具有面电流密度的铁磁边界。根据磁场边界条件计算时，首先要考虑研究域的对称性和周期性，如果研究域具有对称性，在计算时利用对称性，并在对称面上设定法向磁场或切向磁场；如果研究域具有周期性，在计算时利用周期性，并在计算循环时设定循环条件。其次是考虑无穷边界问题，有些无穷边界可以采用边界盒等效方法。

根据麦克斯韦方程组、磁场边界条件和感应加热时变磁场特性，建立如下磁场求解方程：

$$E = -\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}\right) - \mathrm{grad}(V) \tag{13-1}$$

$$\mathrm{rot}(\mu_0 \mu_r \mathrm{rot}(\boldsymbol{A}) - H_c) + \sigma\left(\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} + \mathrm{grad}(V)\right) = 0 \tag{13-2}$$

式中，μ_r 为相对磁导率，μ_0 为真空磁导率，A 为矢量磁位，H_c 为矫顽力（对于永磁体来说），σ 为电导率，V 为电势，t 为时间。

肌肤效应是指当一个圆形断面直导线通以交流电流时，电流在导体截面上的分布将不再是均匀的，导体截面上各点电流密度由外向内从最大连续变化到最小。肌肤效应所引起的肌肤深度可以表示为：

$$\delta = \frac{\sqrt{\rho / \mu f}}{2\pi} \tag{13-3}$$

式中，ρ 为电阻率，f 为感应加热频率，μ 为磁导率。

上式表明，涡流分布高度集中在加热体表面，而且涡流强度随着表面距离的增大而急剧下降，涡流产生的热量与涡流强度的平方成正比，所以，从表面向心部，热量的下降要比涡流下降得更快。

热量传递方式主要有三种，分别是：①传导传热，机理是物体内部各部位彼此接触时，热能从高温部位传递给低温部位；②对流传热，发生在流体与固体之间；③辐射传热，热能以电磁波的形式，在互相不接触的两个物体之间传递，任何高于绝对零度的物体都有辐射能。这三种方式在电磁感应加热时均有发生，其中以热传导占主要部分。

13.2 磁热耦合案例

本节主要介绍 ANSYS Workbench 17.0 的电磁场分析模块 Maxwell 的建模方法及求解过程，计算一个工件在高频线圈的激励下的温度分布。

学习目标：

熟练掌握 Maxwell 的建模方法及求解过程，同时掌握电磁热结构耦合分析方法

模型文件	网盘\Chapter13\mesh.bdf
结果文件	网盘\Chapter13\diancijiare.wbpj

13.2.1 问题描述

某工件被加热的结构模型如图 13-1 所示，工件分为上部分和下部分两种结构，其中上部分工件外侧有一定厚度的保温层，保温层外面为一个通电线圈，下部分工件外面为一个模具结构，试分析当线圈中通过电流密度为 10e6×1.414×sin(4400×pi×time)的电流时，该工件的热分布情况。

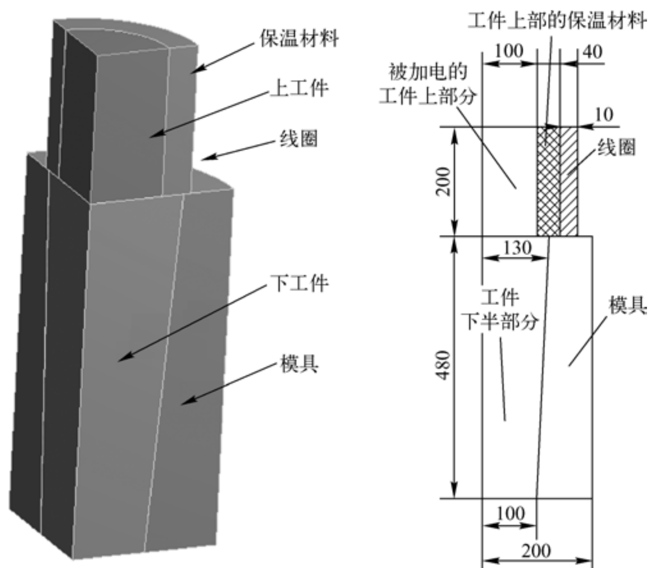


图 13-1　几何模型



13.2.2 软件启动与保存

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：保存工程文档。进入 Workbench 后，单击工具栏中的 Save As...（另存为）按钮，将文件保存为 diancijiare，单击 Getting Started 窗口右上角的“关闭”按钮将其关闭。

注意：本节算例需要用到 ANSOFT Maxwell 17 软件，请读者进行安装。

由于 ANSOFT Maxwell 软件不支持保存路径中存在中文名，故在进行文档保存时，保存的路径不不能含有中文字符，否则会发生错误。

13.2.3 建立电磁分析

Step1：创建电磁场分析。在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Analysis Systems 中单击 Maxwell 2D 并按住左键不放，将其拖到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 Excel 表格的工程分析流程项目 A，如图 13-2 所示。

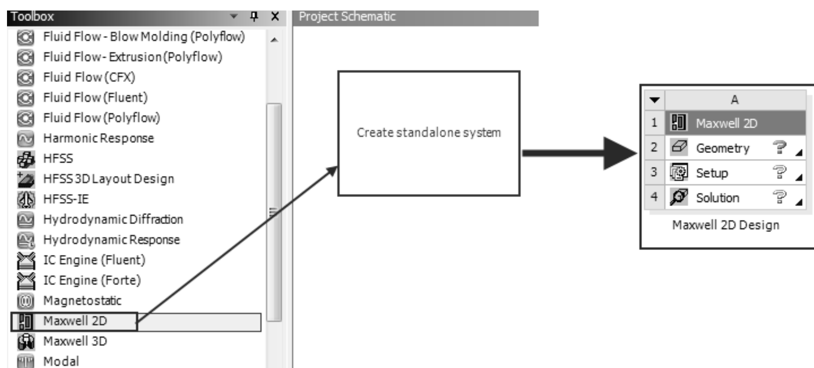


图 13-2 创建电磁分析环境

提示：工程分析流程项目A的A1 栏～A4 栏即是Maxwell 3D软件前处理、计算及后处理的三个过程。

Step2：打开 Maxwell 2D 软件。在 A2：Geometry 项上单击右键会弹出图 13-3 所示的快捷菜单，在快捷菜单中选择 Edit 命令启动 Maxwell 2D 软件，如图 13-4 所示。

提示：在工程分析流程项目A中直接双击A2：Geometry项也可启动Maxwell 2D软件。

Step3：设置求解器。选择菜单栏中的 Maxwell 2D→Solution Type 命令，在弹出的图 13-5 所示的 Solution Type 设置对话框中做如下设置：在 Geometry Mode 栏中选择 Cylindrical about Z 选项；选择 Transient 单选按钮，并单击 OK 按钮。

Step4：设置单位。依次选择 Modeler→Units 菜单，在弹出的图 13-6 所示的 Set Model Units 对话框中将单位设置成 mm，并单击 OK 按钮。

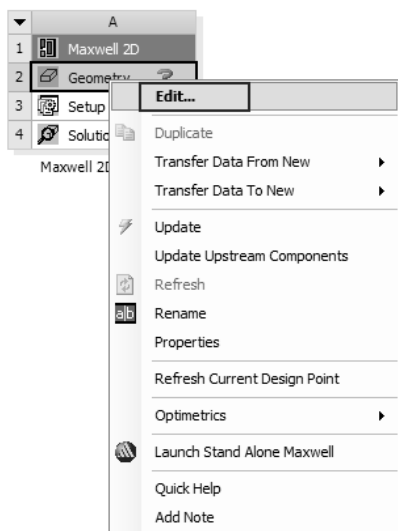


图 13-3 启动 Maxwell

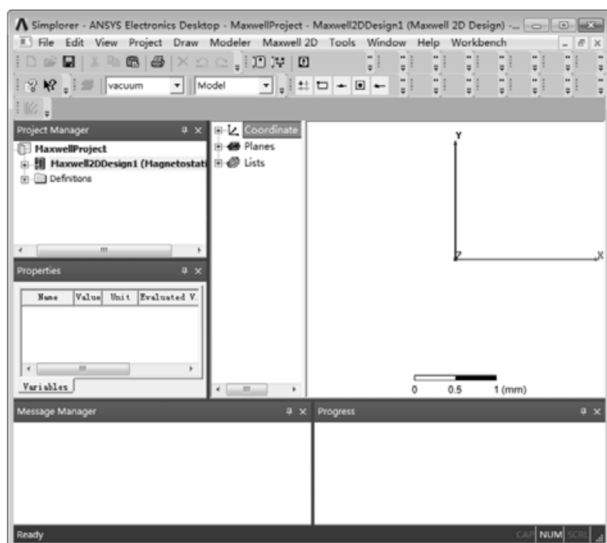


图 13-4 Maxwell 界面

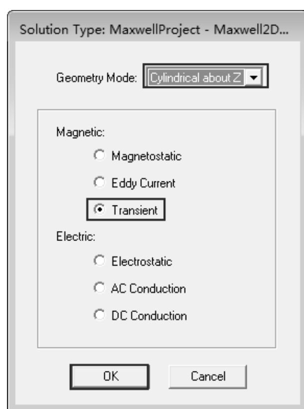


图 13-5 设置求解器类型

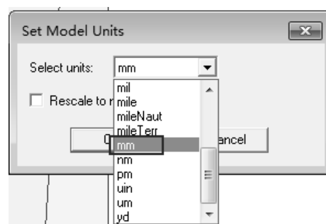


图 13-6 设置单位

13.2.4 几何模型建立

Step1：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建直线，鼠标单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中分步输入：

dX=0，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=130，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=100，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=0，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

此时绘图区域生成图 13-7 所示的四边形几何。

Step2：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建矩形，在右下角出现的坐标长度输入栏中分步输入：

dX=0，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=100，dY=0，dZ=200，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

此时绘图区域生成图 13−8 所示的四边形几何上面的矩形几何。

Step3：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建直线，在右下角出现的坐标长度输入栏中分步输入：

dX=100，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=200，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=200，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=130，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=100，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

此时绘图区域生成图 13−9 所示的四边形几何。

Step4：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建矩形，在右下角出现的坐标长度输入栏中分步输入：

dX=100，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=40，dY=0，dZ=200，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

此时绘图区域生成图 13−10 所示的四边形几何上面的矩形几何。

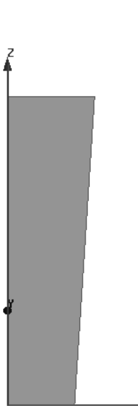


图 13−7　四边形 1

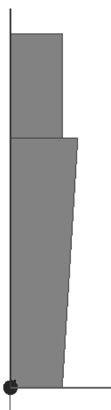


图 13−8　矩形 1

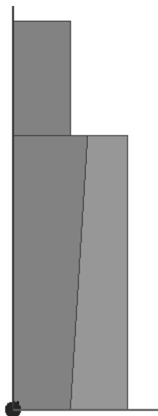


图 13−9　四边形 2

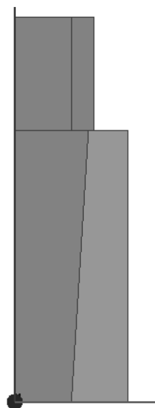


图 13−10　矩形 2

Step5：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建矩形，在右下角出现的坐标长度输入栏中分步输入：

dX=140，dY=0，dZ=480，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

dX=10，dY=0，dZ=200，并按〈Enter〉键完成坐标输入。

此时绘图区域生成图 13−11 所示的四边形几何上面的矩形几何。

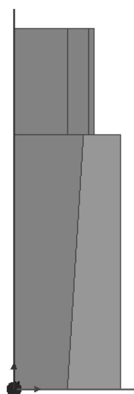


图 13−11　矩形 3

13.2.5　求解域的设置

Step1：单击工具栏中的按钮创建计算域，在左侧 Properties 窗口中作如下设置：+R Padding 栏中输入 2000；在−R Padding 栏中输入 500；在+Z Padding 栏中输入 500；在−Z Padding 栏中输入 500，完成计算域的设置，单击“确定”按钮，如图 13−12 所示。

Step2： 此时创建好的计算域如图 13–13 所示。为了保证计算精度，计算域一般至少要大于几何最大尺寸的 5 倍。

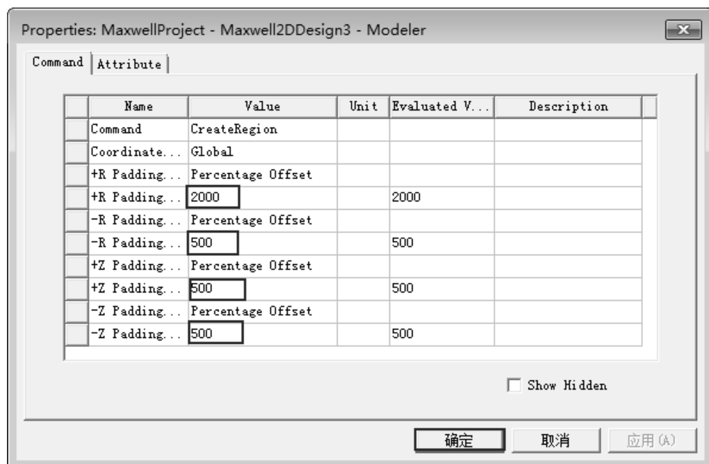


图 13–12 矩形 4

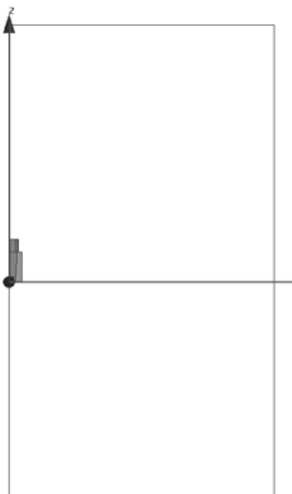
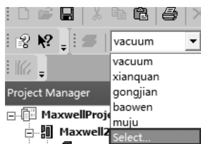


图 13–13 计算域

13.2.6 创建并赋材料

Step1： 启动材料属性管理器。在工具栏中选择 vacuum 下拉选项，此时弹出图 13–14 右侧所示的 Select Definition（材料属性定义）管理器。



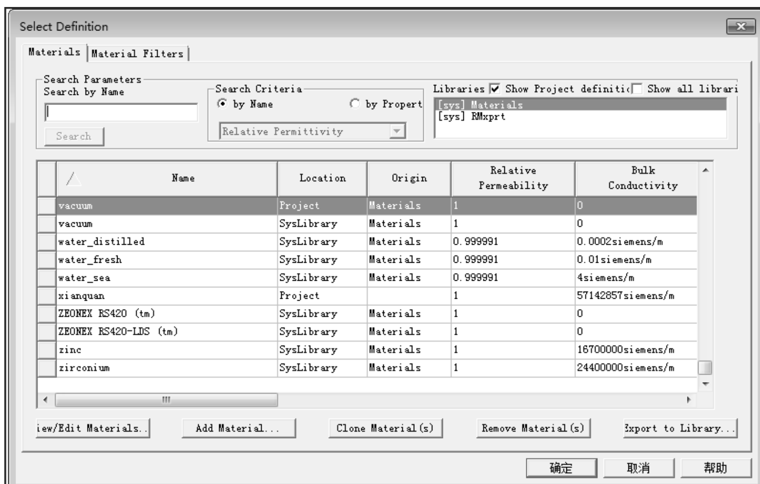


图 13–14 材料管理器

Step2： 单击 Add Material 按钮，此时弹出图 13–15 右图所示的材料定义对话框，在对话框中作如下设置：在 Material Name 栏中输入材料名称为 xianquan；在 Relative Permeability 栏中的 Value 中输入 1；在 Bulk Conductivity 栏中的 Value 中输入 57142857，其余默认即可，单击 OK 按钮。



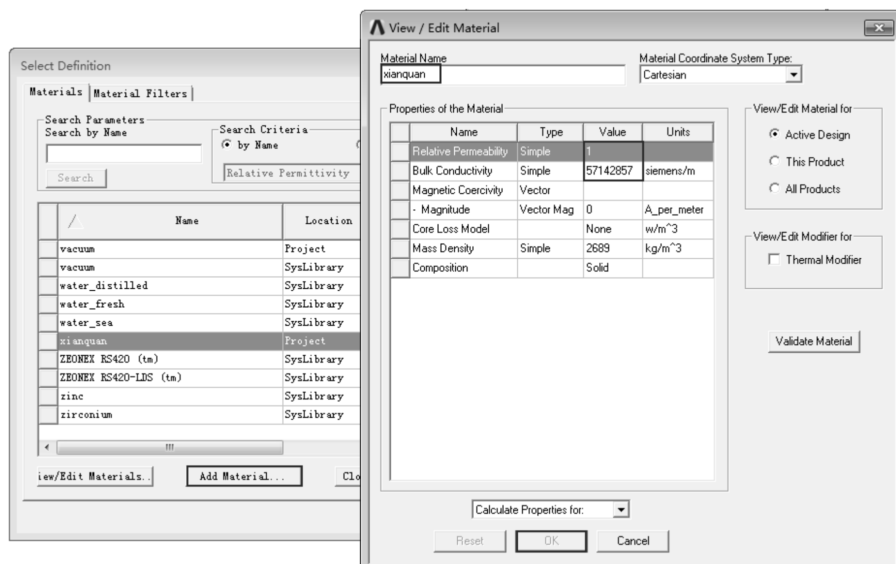


图 13-15　输入材料 1

Step3：单击 Add Material 按钮，此时弹出图 13-16 右图所示的材料定义对话框，在对话框中作如下设置：在 Material Name 栏中输入材料名称为 gongjian；在 Relative Permeability 栏中的 Value 中输入 1；在 Bulk Conductivity 栏中的 Value 中输入 801474.71；勾选右侧的 Thermal Modifier 复选框，并在 Bulk Conductivity 栏中的 Thermal Modifier 中选择 Edit 选项。

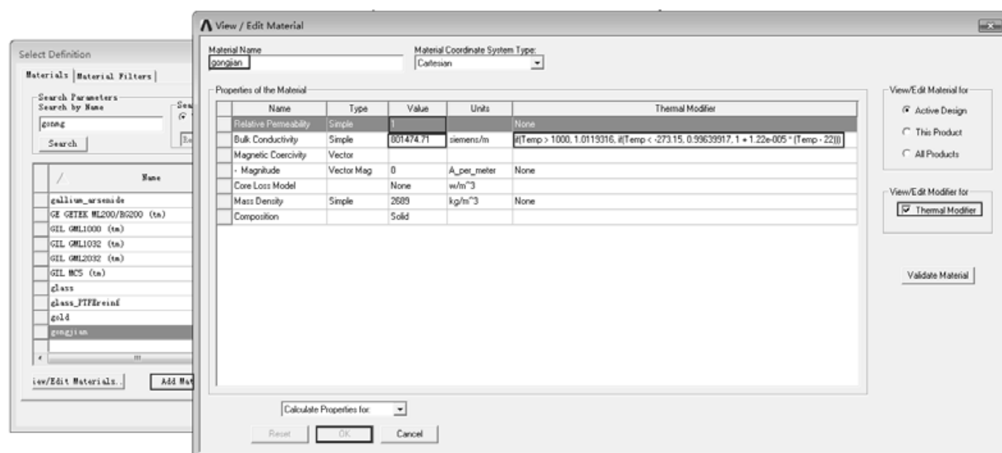
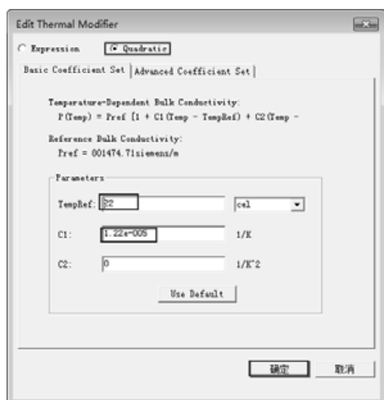


图 13-16　输入材料 2

Step4：在弹出的如图 13-17 所示的 Edit Thermal Modifier 对话框中作如下设置：选择 Quadratic 单选按钮；在 Basic Coefficient Set 选项卡中的 TemRef 栏中输入 22，单位为 cel；在 C1 栏中输入 1.22e-005，并单击“确定”按钮。

Step5：单击 Add Material 按钮，此时弹出图 13-18 右图所示的材料定义对话框，在对话框中作如下设置：在 Material Name 栏中输入材料名称为 muju；在 Relative Permeability 栏中的 Value 中输入 1；在 Bulk Conductivity 栏中的 Value 中输入 0.007149，其余默认即可，单击 OK 按钮。



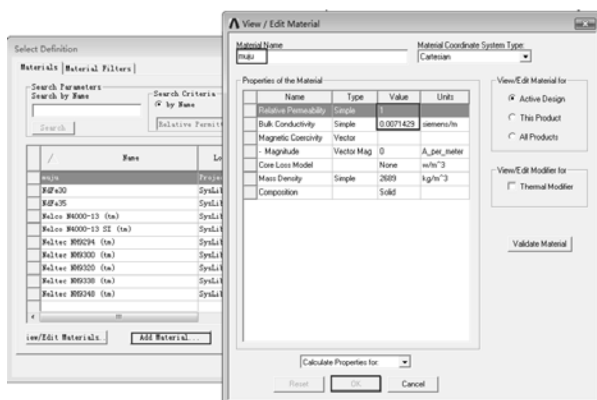


图 13−17　输入材料 3　　　　图 13−18　输入材料 4

Step6：在中间列中选择上工件和下工件对应的文件名（即图 13−19 左图中的 Polyline1 和 Rectangle1），单击右键，在弹出的图 13−19 左图所示的快捷菜单中选择 Assign Material，然后选择材料名称为 gongjian，并单击“确定”按钮，如图 13−19 右图所示。

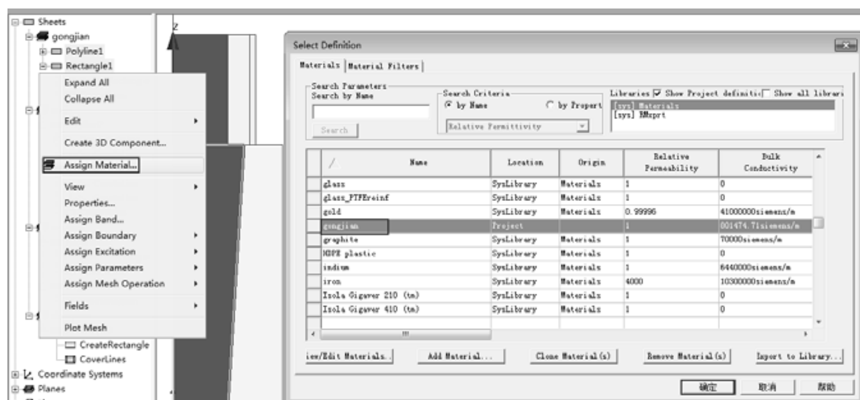


图 13−19　设置材料 1

Step7：在中间列中选择模具对应的文件名（即图 13−20 左图中的 Polyline2），单击右键，在弹出的图 13−20 左图所示的快捷菜单中选择 Assign Material，然后选择材料名称为 muju，并单击“确定”按钮，如图 13−20 右图所示。

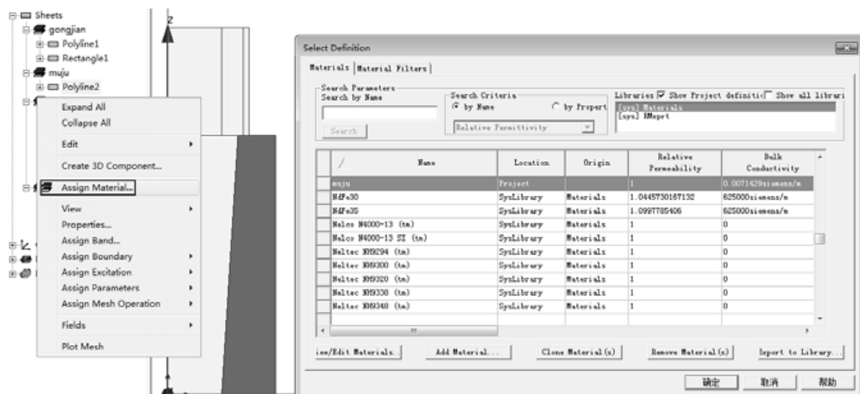


图 13−20　设置材料 2



Step8：在中间列中选择模具对应的文件名（即图 13-21 左图中的 Rectangle3），单击右键，在弹出的图 13-21 左图所示的快捷菜单中选择 Assign Material，然后选择材料名称为 xianquan，并单击“确定”按钮，如图 13-21 右图所示。

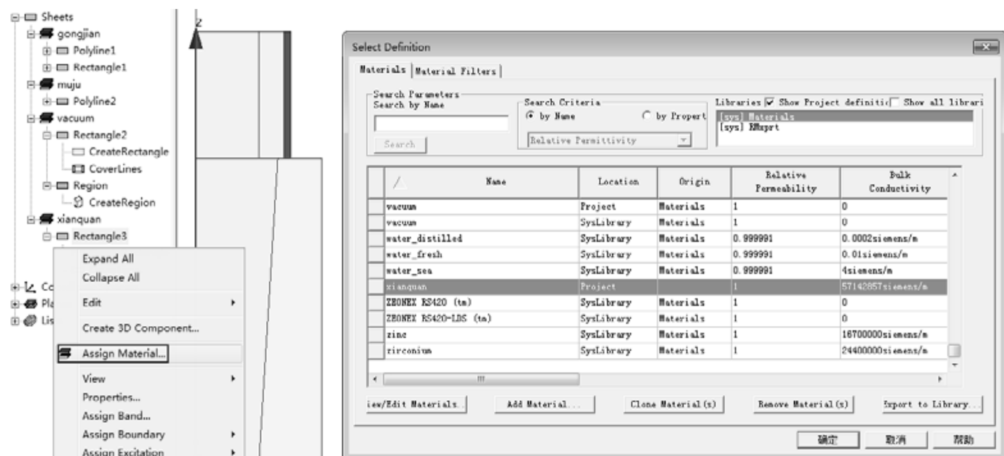
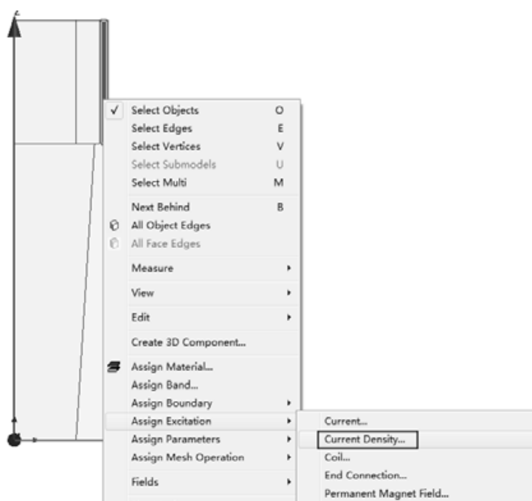


图 13-21　设置材料 3

Step9：求解域和保温材料均默认为 Vacuum（真空）。

13.2.7 添加激励

Step1：创建激励。在键盘上按〈F〉键，然后用鼠标左键选择图 13-22 所示的线圈截面，单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Assigned Excitation→Current Density 命令，此时弹出图 13-23 所示的 Current Density Excitation 对话框，在该对话框的 Value 栏中输入 10e6*1.414*sin（4400*pi*time），单击“确定”按钮，完成参数的设置。



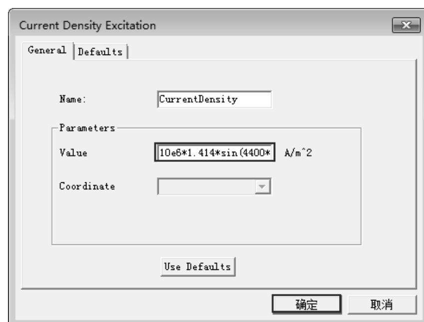


图 13-22　创建激励　　　　　图 13-23　设置激励数值

Step2：依次单击菜单 Maxwell 2D→Excitations→Set Eddy Effects 命令，此时弹出图 13-24

所示的对话框，在对话框中勾选 Polyline1 和 Rectangle1 后的复选框，并单击 OK 按钮。

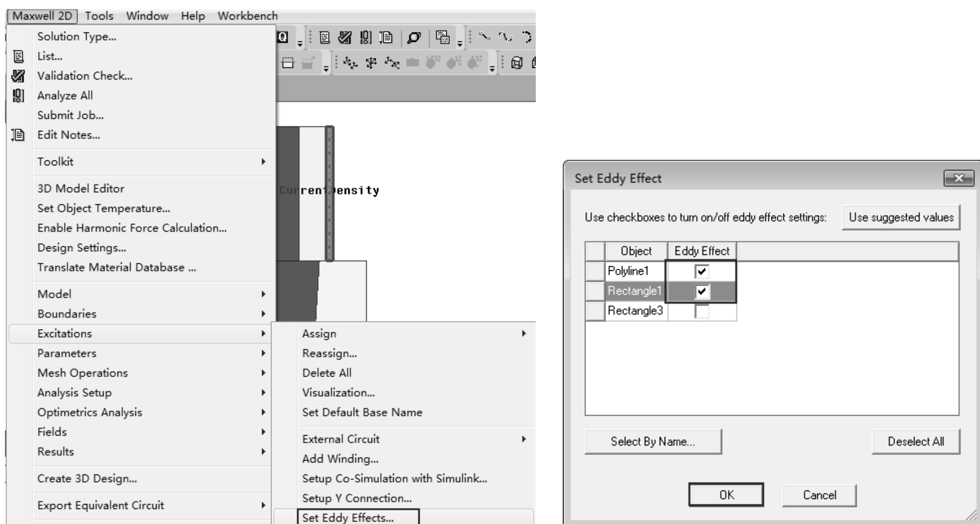
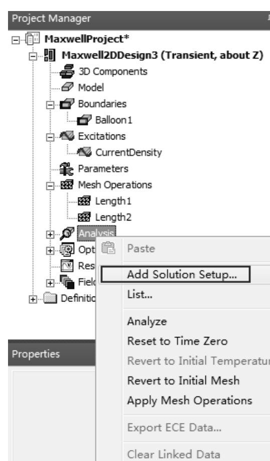


图 13-24　设置涡流效应

13.2.8 分析步创建

Step1：添加一个分析步。在 Project Manager 中的 Analysis 命令上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择图 13-25 所示的 Add Solution Setup 命令，此时弹出图 13-26 所示的 Solve Setup 对话框：在 General 选项卡中设置 Stop time 为 0.02，设置 Time step 为 0.001；切换到 Save Fields 选项卡，设置 Start 为 0，设置 Stop 为 0.02，Step 为 0.001；单击 Add to List 按钮，其余默认即可，单击“确定”按钮，此时在 Analysis 下会出现一个 Setup1 命令。



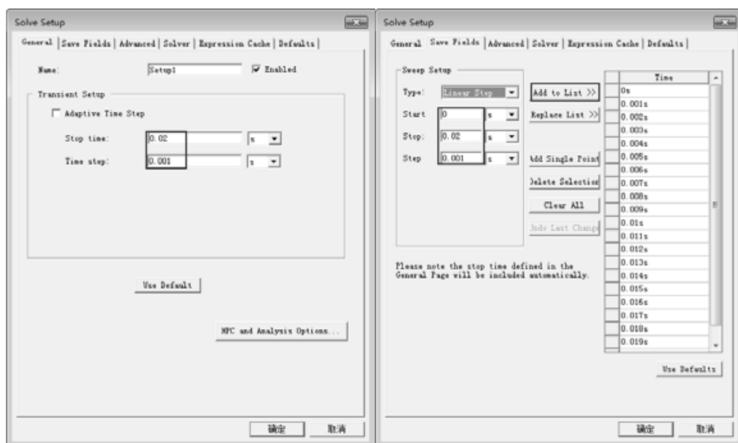


图 13-25　添加一个分析步

图 13-26　分析步参数设置

Step2：选择工件（上工件和下工件）并单击右键，在弹出的图 13-27 所示的快捷菜单中依次选择 Assign Mesh Operation→On Selection→ Skin Depth Based 命令。

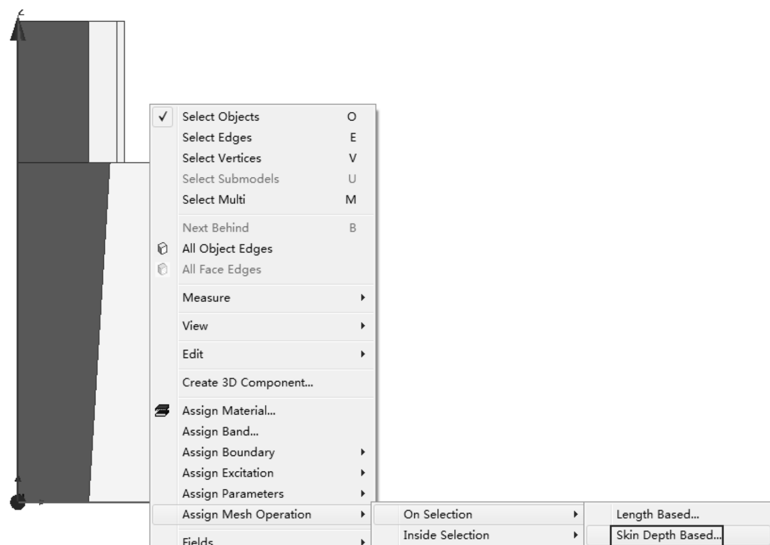


图 13–27　快捷菜单 1

Step3：在弹出的 Skin Depth Based Refinement 对话框中作如下设置：单击 Calculate Skin Depth 按钮，在弹出的 Calculate Skin Depth 对话框中输入 Frequency（频率）为 2200，单位选择 Hz，单击 OK 按钮，然后单击 Skin Depth Based Refinement 窗口上的 OK 按钮完成肌肤深度的设置，如图 13–28 所示。

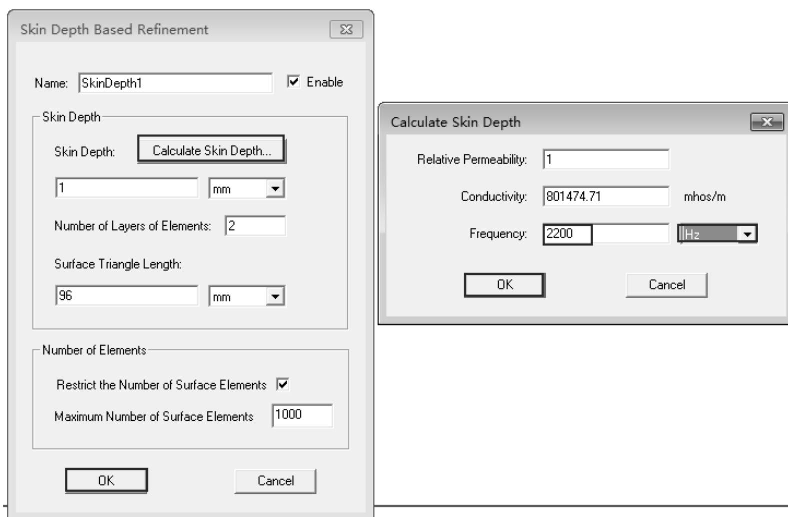


图 13–28　肌肤深度设置

Step4：选中所有几何（排除计算域）并单击右键，在弹出的图 13–29 所示的快捷菜单中依次选择 Assign Mesh Operation→Inside Selection→ Length Based 命令。

Step5：此时弹出图 13–30 所示的 Element Length Based Refinement 对话框，在 Maximum Length of Elements 中输入 5，并单击 OK 按钮。



图 13-29 快捷菜单 2

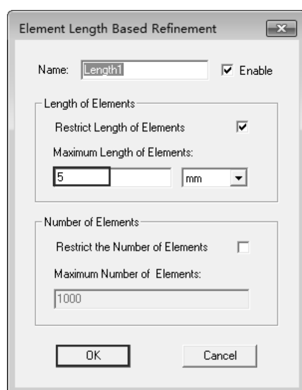


图 13-30 网格设置 1

Step6：选中计算域并单击右键，在弹出的图 13-31 所示的快捷菜单中依次选择 Assign Mesh Operation→Inside Selection→ Length Based 命令。

Step7：此时弹出图 13-32 所示的 Element Length Based Refinement 对话框，在 Maximum Length of Elements 中输入 100，并单击 OK 按钮。

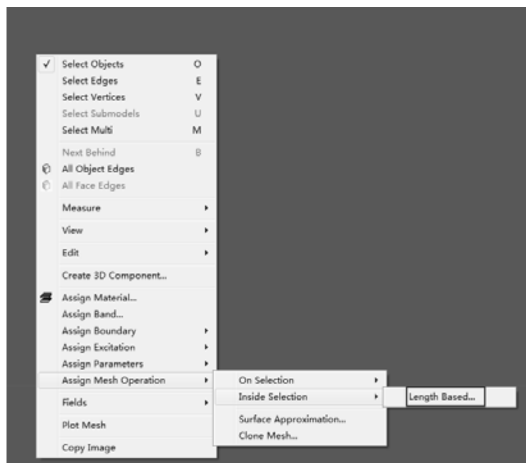


图 13-31 快捷菜单 3

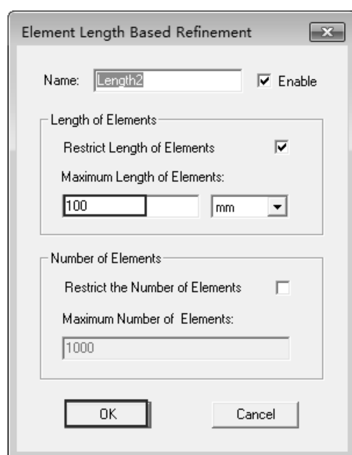


图 13-32 网格设置 2

Step8：右键选择 Setup，在弹出的图 13-33 所示的快捷菜单中选择 Apply Mesh Operations 命令，执行网格划分操作。

Step9：划分完成后，框选所有几何，然后单击右键，在弹出的图 13-34 所示的快捷菜单中选择 Plot Mesh 命令。

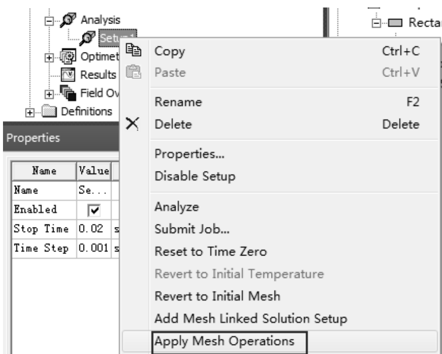


图 13−33　快捷菜单 4

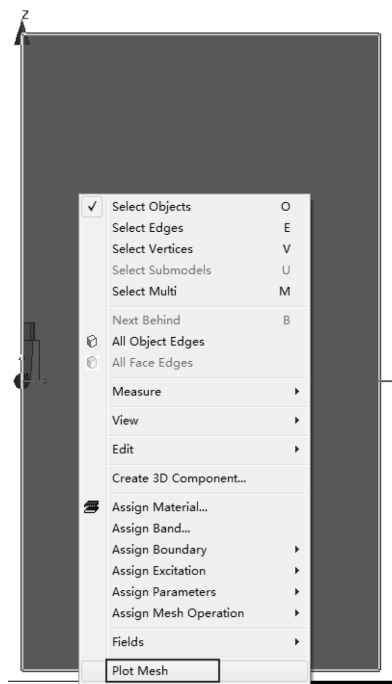


图 13−34　网格显示

Step10：图 13−35 所示为划分网格后的网格图，左侧的图为计算域的网格大小图，右侧的图为零件等的网格尺寸图。

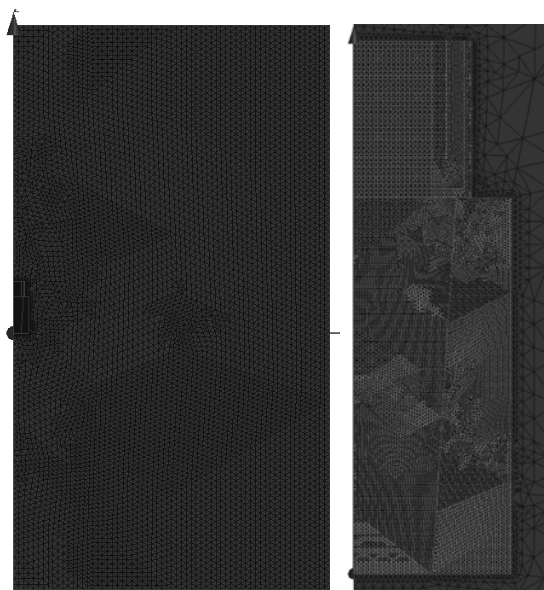


图 13−35　网格图

Step11：此外，单击工具栏中的按钮后将弹出图 13−36 所示的对话框，在对话框的 Mesh Statistics 选项卡中显示出不同结构的网格数量及网格大小。

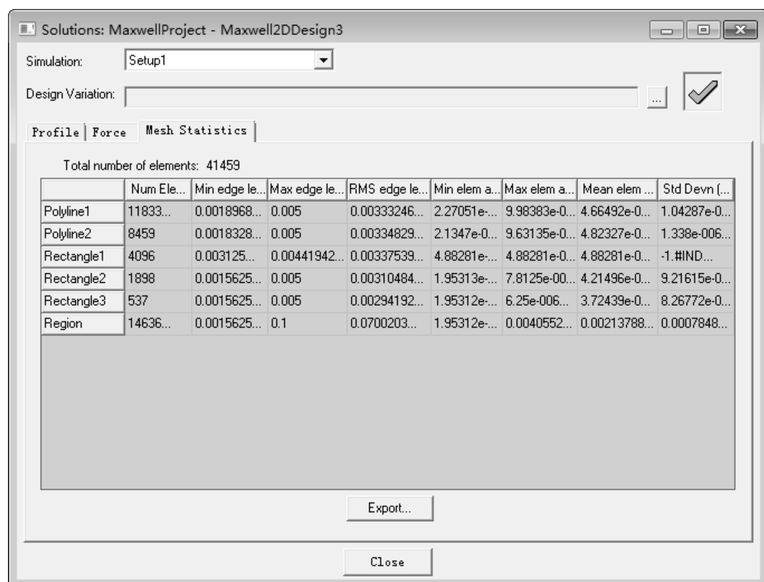


图 13-36 网格统计

13.2.9 模型检查与计算

执行完上面的操作步骤后，有限元分析的前处理工作全部结束，为了保证求解能顺利完成，需要先检查一下前处理的所有操作是否正确。

Step1：模型检查。单击工具栏上的按钮，出现图 13-37 所示的 Validation Check：MaxwellProject-Maxwell2D Design 3 对话框，绿色对号说明前面的基本操作步骤没有问题。

注意：如果出现了⊗，说明前处理过程中某些步骤有问题，请根据右侧的提示信息进行检查。

Step2：求解计算。右键单击 Project Manager 中的 Analysis→Setup1 命令，在弹出的快捷菜单中选择图 13-38 所示的 Analyze 命令，进行求解计算，求解需要一定的时间。

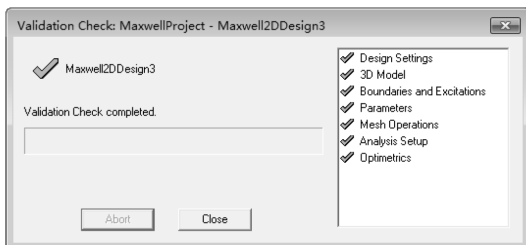


图 13-37 模型检查

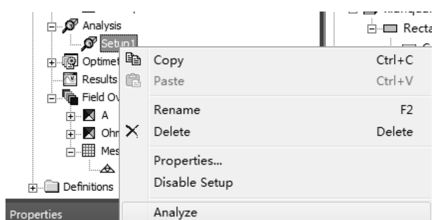


图 13-38 求解模型

13.2.10 后处理

Step1：工件的涡流分布。求解完成后，选中两个工件模型并单击右键，在弹出的图 13-39

所示的快捷菜单中选择 Fields→J→J_Vector 命令，此时弹出图 13-40 所示的 Create Field Plot 对话框。

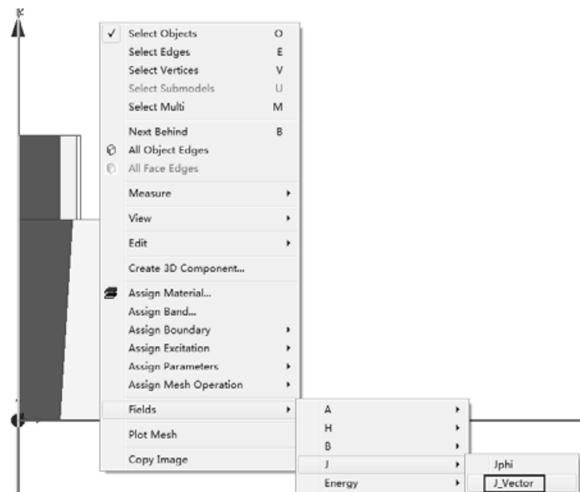


图 13-39　后处理操作

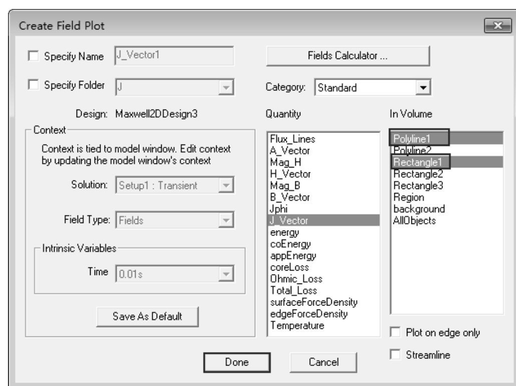


图 13-40　选择后处理实体

Step2：在 Create Field Plot 对话框的 Quantity 栏中选择 J_Vector，在 In Volume 栏中选择上工件和下工件。涡电流密度矢量图如图 13-41 所示。

右键选择 Field Overlap，在弹出的图 13-42 所示的快捷菜单中选择 Calculator 选项。

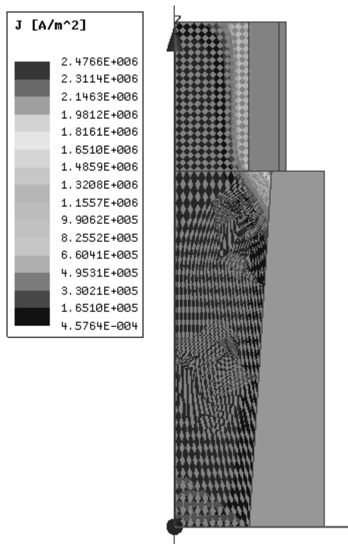


图 13-41　电流密度矢量图

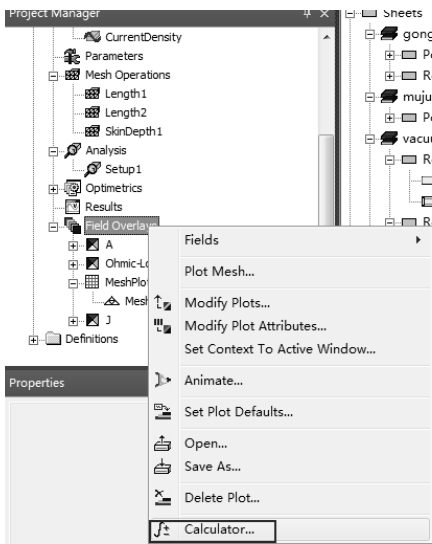


图 13-42　快捷菜单

Step3：在弹出的如图 13-43 所示的 Fields Calculator 对话框中作如下设置。

在 Quality 栏中选择 OhmicLoss 选项；

在 Geometry 栏中选择上工件对应的名称，单击 OK 按钮；

在 Integral 栏中选择 Rz，单击 Eval 按钮，此时完成当前时刻的损耗计算。

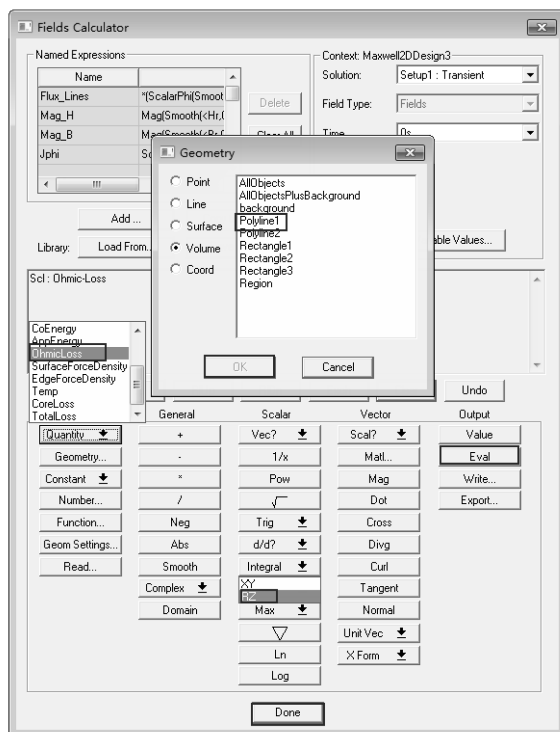


图 13-43　计算器

Step4：单击（保存）按钮保存文件，然后单击（关闭）按钮关闭 Maxwell 2D 软件，返回到 Workbench 主窗口。

13.2.11 创建几何数据共享

Step1：回到 Workbench 窗口中，添加图 13-44 所示的 Finite Element Modeler 有限元网格分析工具。

注：由于这里的结构网格模型是通过其他软件建立的，因此不再赘述网格划分的方法。

右键选择 A2：Model 项，在弹出的图 13-45 所示的快捷菜单中依次选择 Add Input Mesh→Browse 选项。

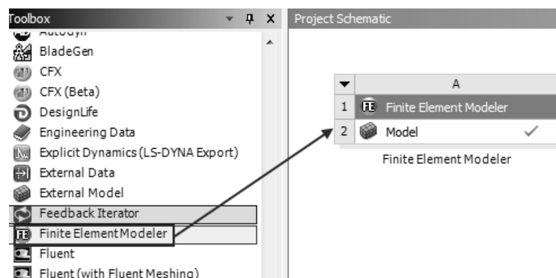


图 13-44　FEM 工具

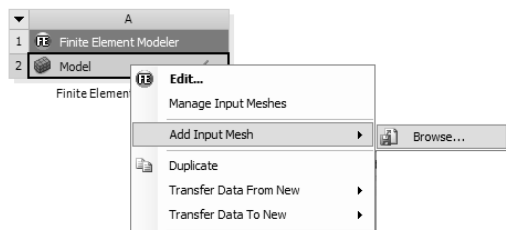


图 13-45　快捷菜单 1

Step2：弹出图 13−46 所示的“打开”对话框，将文件类型改为*.bdf 格式，然后选择 mesh.bdf 文件，单击“打开”按钮。

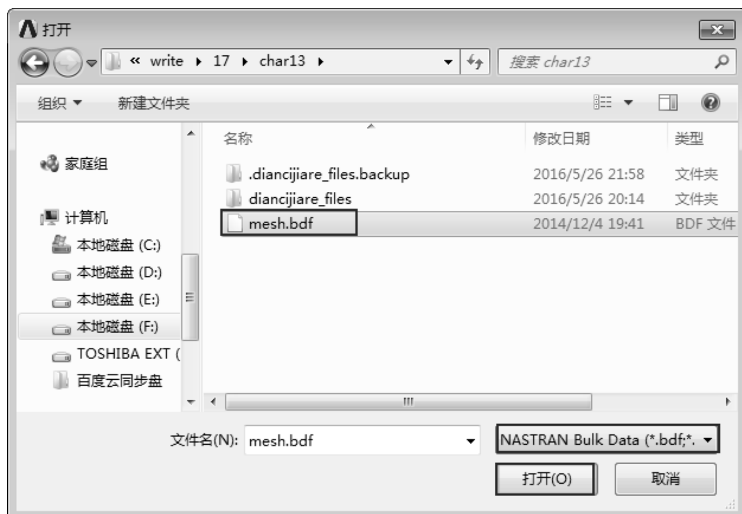


图 13−46 “打开”对话框

Step3：此时双击 A2：Model 项，弹出图 13−47 所示的 FEM 网格工具平台，这里不对几何进行操作，关闭即可。

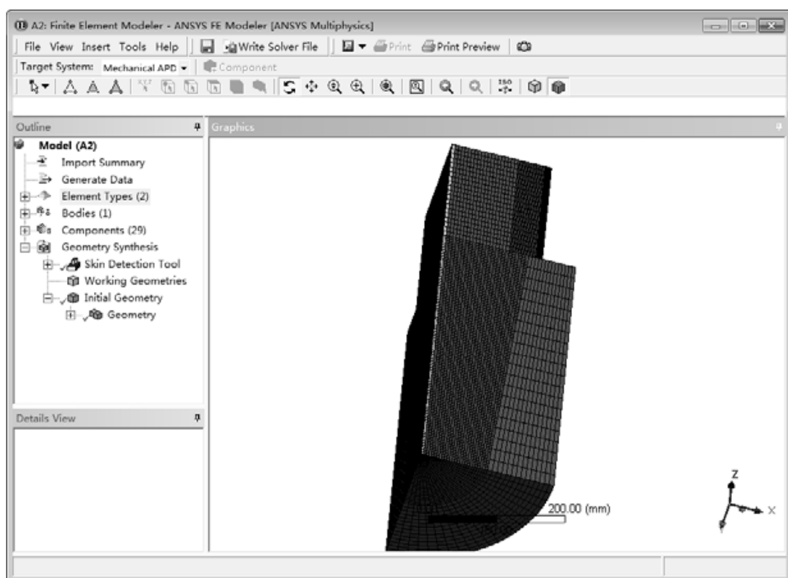


图 13−47 FEM 平台

Step4：建一个瞬态热分析流程图，如图 13−48 所示，将 A2：Model 项中的网格数据直接曳到 B3：Mesh 项中，此时 B 项目将减少了一个几何建模流程。

双击 B2 项进行材料属性的定义，首先定义材料名称为“保温”，然后添加一个 Isotropic Thermal Conductivity 属性，并按图 13−49 所示设置保温层材料的导热系数为 1.44。

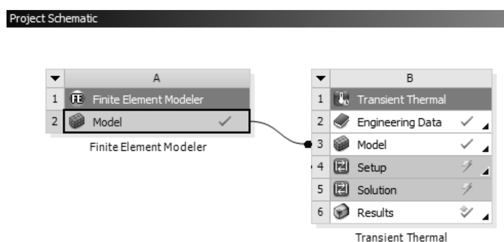


图 13-48 流程图

Outline of Schematic B2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	保温				
5	工件				
6	模具				
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 4: 保温

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Isotropic Thermal Conductivity	1.44	W m^-...		

图 13-49 材料属性 1

Step5：再次定义材料名称为“工件”，然后添加一个 Isotropic Thermal Conductivity 属性，并按图 13-50 所示设置保温层材料的导热系数为 21.1。

接着定义材料名称为“模具”，然后添加一个 Isotropic Thermal Conductivity 属性，并按图 13-51 所示设置保温层材料的导热系数为 35，Density（密度）为 7110，Specific Heat（比热）为 836。

Outline of Schematic B2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	保温				
5	工件				
6	模具				
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 5: 工件

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Isotropic Thermal Conductivity	21.1	W m^-...		

图 13-50 材料属性 2

Outline of Schematic B2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	保温				
5	工件				
6	模具				
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 6: 模具

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7110	kg m^-3		
3	Isotropic Thermal Conductivity	35	W m^-...		
4	Specific Heat	836	J kg^-...		

图 13-51 材料属性 3

Step6：双击项目 B 中的 B3 栏进入到 Mechanical 热分析平台，在热分析平台中依次选择 Outline（分析树）窗口下面的 Model（B3）→Geometry→线圈，然后单击右键，并在弹出的快捷菜单中选择 suppress 命令，将当前选中零件抑制掉，如图 13-52 所示。

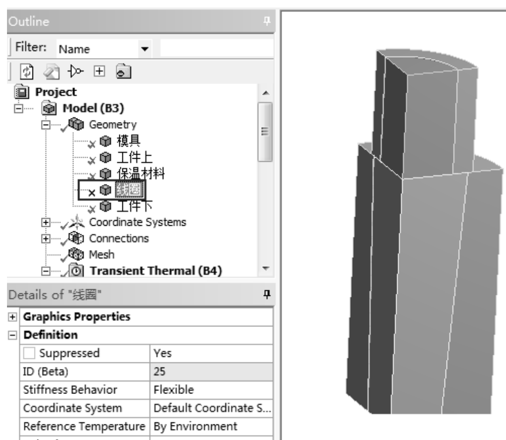


图 13-52 抑制

Step7：依次分别将模具几何的材料设置为模具，工件上与工件下的材料设置为工件，保温材料几何的材料设置为保温，如图 13−53 所示。

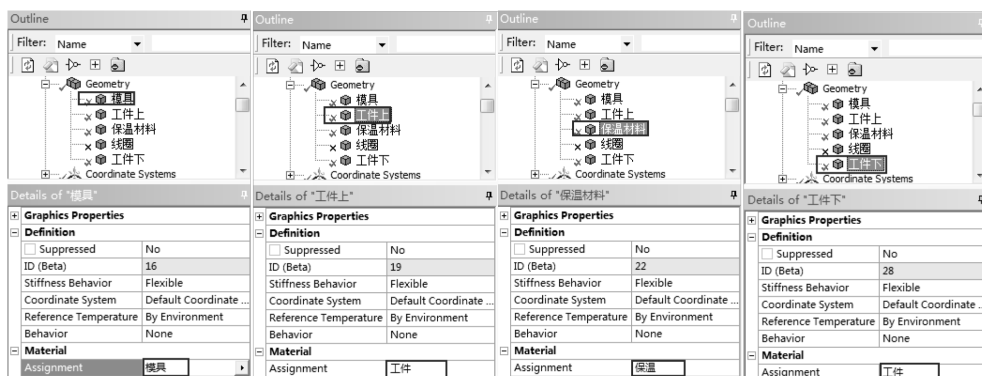


图 13−53　设置材料

Step8：在 Outline（分析树）窗口中单击 Mesh 选项，此时在绘图窗口中显示出图 13−54 所示的已经划分完成的网格。

Step9：单击 Transient Thermal（B4），在工具栏中添加一个 Convection 选项，然后单击 Convection，在下面出现的如图 13−55 所示的 Details of“Convection”详细设置面板中作如下设置：在 Geometry 栏中选择几何实体所有外表面，并单击 Apply 按钮；在 Film Coefficient 栏中输入对流系数为 5.e+006，单位默认；在 Ambient Temperature 栏中输入温度为 22℃，其余默认即可。

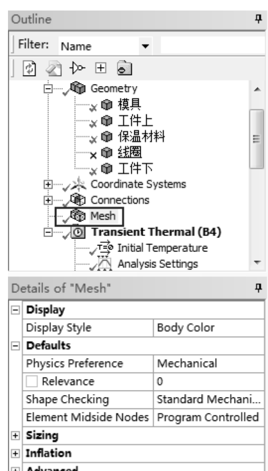


图 13−54　网格显示

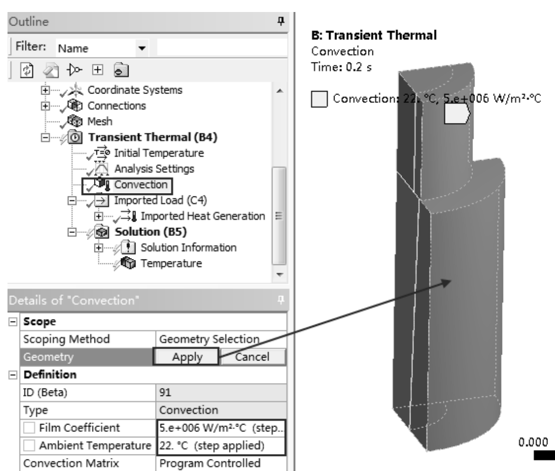


图 13−55　设置参数

Step10：单击 Analysis Settings 选项，在下面出现的如图 13−56 所示的 Details of“Analysis Settings”详细设置面板中作如下设置：在 Step End Time 栏中输入时间为 0.2s；在 Auto Fime Stepping 栏中选择 Off 选项；在 Define By 栏中选择 Time 选项，其余默认即可。

Step11：右键选择 Import Load（C4），在弹出的图 13−57 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Heat Generation 选项。

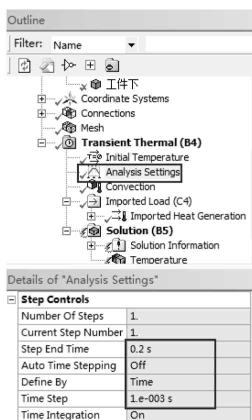


图 13-56 设置

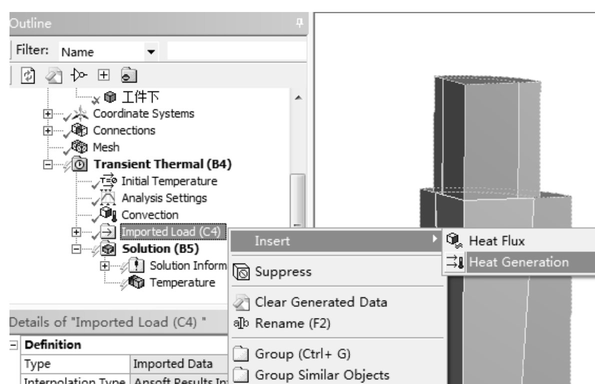


图 13-57 快捷菜单 2

Step12：在 Heat Generation 选项的 Geometry 栏中选中上下两个工件，并单击 Generate（生成）按钮，经过一段时间的计算，显示出图 13-58 所示的损耗密度分布云图。

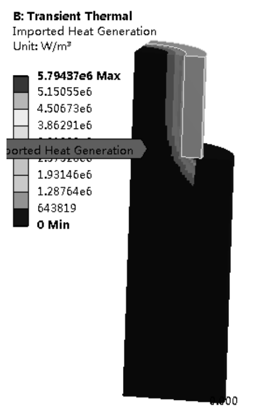


图 13-58 损耗密度分布

Step13：返回到 Workbench 平台中，在左侧的 Toolbox 工具箱中选择 Component Systems（组件系统）下面的 Feedback Iterator 选项，此时在左侧的 Project Schematic 窗口中出现了 Feedback Iterator 项目，将 C4 栏连接到 B4 栏，将 C3 栏连接到 D2 栏，如图 13-59 所示。

Step14：在项目 D 中右键选择 D2 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Properties 选项，如图 13-60 所示。

Step15：此时出现图 13-61 所示的 Properties of Schematic D2：Feedback Iterator 设置面板，在面板中做如下设置：在 Max Iterations 栏中输入 5；在 Target Delta Temperature%栏中输入 5；在 Target Delta Displacement%栏中输入 5，其余默认即可。

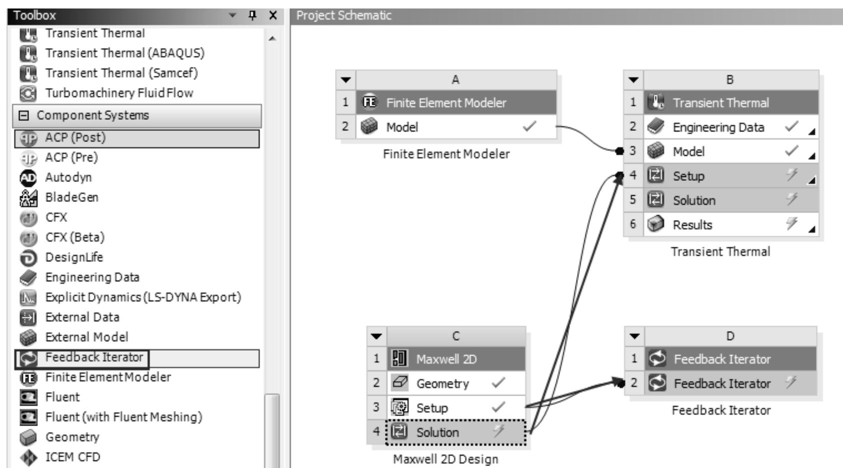


图 13-59 数据传递

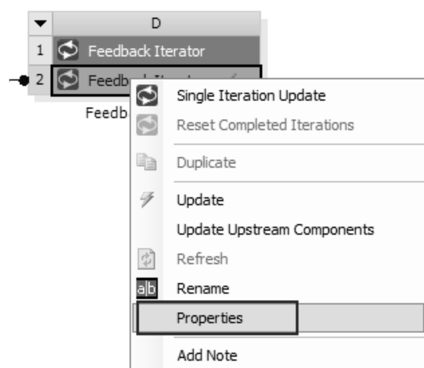


图 13-60 快捷菜单 3

Properties of Schematic D2: Feedback Iterator

	A	B
1	Property	Value
2	⊟ General	
3	Component ID	FeedbackIterator
4	Directory Name	FeedbackIteratorComponent
5	⊟ Notes	
6	Notes	
7	⊟ Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	ane3fl
9	⊟ Iterations	
10	Iterations Completed	5
11	Max Iterations	5
12	⊟ Callback	
13	Script	
14	⊟ Temperature Convergence	
15	Target Delta Temperature %	5
16	Latest Delta Temperature %	Not Available
17	⊟ Displacement Convergence	
18	Target Delta Displacement %	5
19	Latest Delta Displacement %	Not Available

图 13-61 设置面板

Step16： 设置完成后，返回到 Workbench 平台中，并在项目 D 的 D2 栏中单击右键，在弹出的图 13-62 所示的快捷菜单中选择 Update 选项，此时进入仿真计算进程。

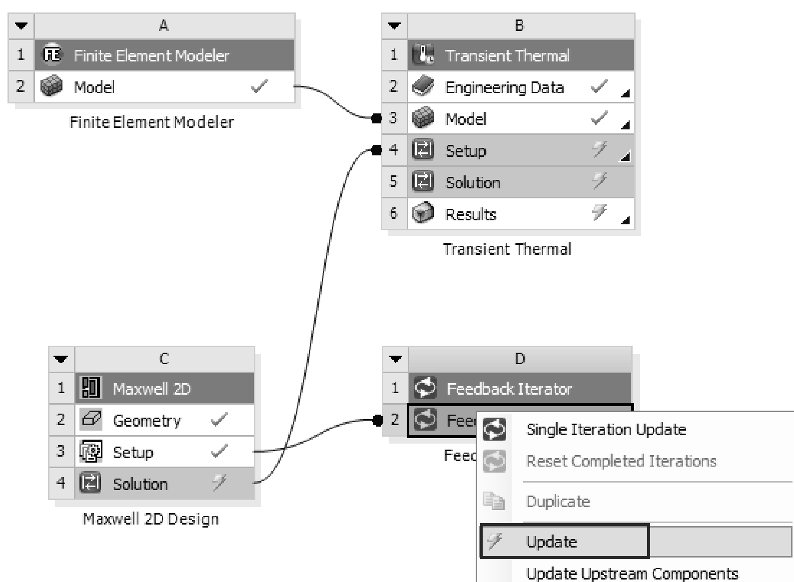


图 13-62 执行计算

Step17： 经过长时间的计算后，双击项目 B 中的 B6 栏进入到 Mechanical 热分析平台中，单击 Solution（B5），然后添加一个 Temperature 选项，执行后处理操作后，将显示出图 13-63 所示的温度分布云图，此温度分布云图为最后时刻的温度分布云图。

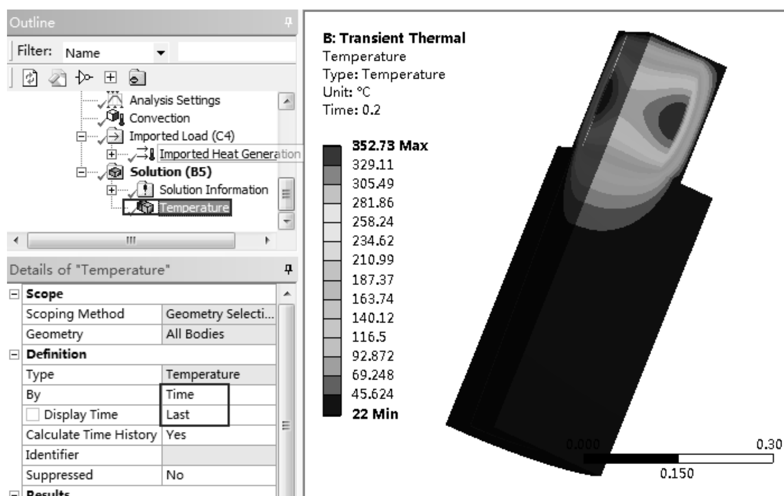


图 13-63　最后时刻的温度分布云图

Step18：单击 Solution（B5）→Solution Information 下面的最大温度和最小温度显示，此时将显示图 13-64 所示的不同时刻的最大温度和最小温度曲线图。

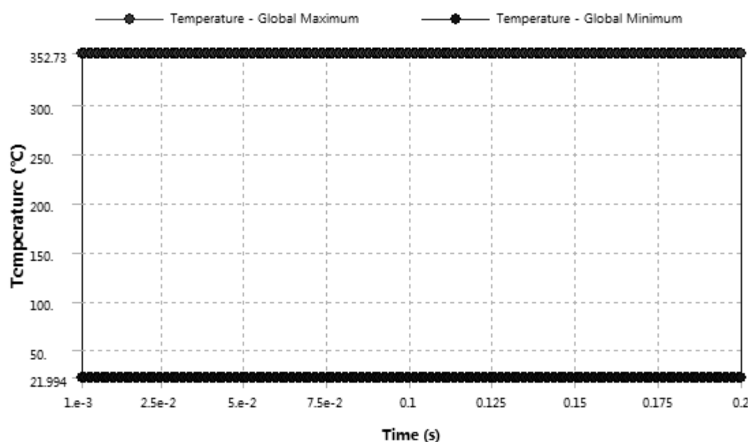


图 13-64　不同时刻的最大温度和最小温度曲线

Step19：返回到 Workbench 窗口，单击 Save（保存）按钮保存文件，然后单击 ☒（关闭）按钮退出。

13.3　本章小结

本章节以对一个工件在高频线圈中进行电磁感应加热的操作方法为主线，向读者介绍了电磁感应加热的原理及仿真过程的操作方法。通过本章节的学习，读者应该对 ANSYS Workbench 平台的电磁感应加热的分析方法及操作过程有详细的认识。

第 14 章　电磁热流耦合分析

电磁热流耦合分析是通过电磁理论与流体动力学理论相结合的方式，对某一种发热体在自然对流或者强迫对流情况下的散热或者热分布进行模拟的方法，为优化结构和散热条件进行优化奠定理论研究基础。本章主要对电力系统中常用的 GIS 几何建模及电流产生的热场分布进行了综合模拟。

知识点 \ 学习目标	了　解	理　解	应　用	实　践
电磁热流耦合分析的基本概念	√	√		
电磁热流耦合分析操作方法		√	√	√
电磁热流耦合分析的应用领域		√	√	√

14.1　电磁热流耦合概述

随着我国电力系统向特高压、大容量、智能化方向发展，对电力设备安全稳定运行的要求也不断提高。作为电力系统中的重要传输设备，气体绝缘组合电器（也称为 GIS 母线）虽然具有运行可靠、结构紧凑等诸多优点，但是也面临着电流大、损耗发热严重的难题。为了降低过热风险，保证其安全稳定运行，需要通过电磁热流耦合的方法对其进行发热分析，然后通过优化手段优化结构来降低其发热。

损耗发热计算分析是 GIS 母线设计的重要环节，涉及电磁场、流场、温度场以及传热学等诸多学科的理论。

下面从电磁与热流两个方面对其解算方法进行论述。

1. 电磁场问题

母线区域的电磁场控制方程为

$$\nabla \times (\gamma \nabla \times \boldsymbol{A}) = J \tag{14-1}$$

式中，$\boldsymbol{A}$ 为矢量磁位；J 为源电流密度；γ 为媒质的磁阻率。

在二维电磁场求解中，设矢量磁位和电流密度只有 Z 轴分量，即 $A_x = A_y = 0$，$J_x = J_y = 0$，则式（14−1）可化为：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma \frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\gamma \frac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -J_z \tag{14-2}$$

而

$$J_z = J_{RZ} + J_{CZ} \tag{14-3}$$

$$J_{CZ} = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \tag{14-4}$$

式中，J_{RZ} 为已知源电流密度；J_{CZ} 为磁场变化在导电区域中感应出的电流密度；σ 为导电

区域的电导率。

对于二维正选交变电磁场，控制方程可化为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\gamma\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)=-J_{CZ}+j\omega\sigma A_z \tag{14-5}$$

引入库仑定律$\nabla\cdot A=0$，并在离外壳较远位置设置远端边界条件$A=0$，即构成了 GIS 母线的正弦时变电磁场问题。

通过有限元后处理，得到了导电区域中单个单元的电流为

$$I_e=\iint_{S_e}J_{ze}\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{14-6}$$

单个单元的损耗为

$$P_e=I_e^2\frac{L_{ef}}{\sigma S_e} \tag{14-7}$$

式中，J_{ze}为该剖分单元的电流密度；S_e为该剖分单元的面积；L_{ef}为母线计算区域的轴向长度。

因此，该导电区域损耗的表达式为

$$P=\sum_{e=1}^{n}P_e \tag{14-8}$$

式中，n为该区域的剖分单元总数。

由此可求出母线导体和金属外壳中的损耗，作为温度场计算的热源。

2. 流场与温度场问题

在二维温度场求解中，该类母线在直角坐标系下的热传导微分方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)=-q_V \tag{14-9}$$

式中，λ为介质导热系数；t为待求温度；q_V为单位体积在单位时间内所发出的热流量。

气体的稳态自然对流可表述为以下三个方程，即

质量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}=0 \tag{14-10}$$

动量守恒方程：

$$\begin{aligned}&\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial y}\right),\\&\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\rho g\beta\Delta t\end{aligned} \tag{14-11}$$

能量守恒方程：

$$\rho cu\frac{\partial t_q}{\partial x}+\rho cv\frac{\partial t_q}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t_q}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t_q}{\partial y}\right)+q_V \tag{14-12}$$

式中，ρ为气体密度；P为气体压力；η为气体运动粘性系数；u、v分别为气体速度在x、y两个方向的分量；g为重力加速度；β为体膨胀系数；Δt为冷热面之间的温差；t_q为气体温度；c为比热容。

考虑到辐射散热的影响，在内部导体与金属外壳面施加相应的辐射散热系数。

对于距离外壳壁面较远的空气，认为其不受热源影响，将其作为流场计算的远端，其温度设定为外部环境温度，即为一常数。

14.2 电磁热流耦合案例

本节主要介绍 ANSYS Workbench 17.0 的电磁场分析模块——Maxwell 的建模方法及求解过程，计算在通过电流时 GIS 母线内部的流场及温度场分布。

学习目标：

熟练掌握 Maxwell 的建模方法及求解过程，同时掌握电磁热流耦合分析方法。

模型文件	网盘\Chapter14\mesh.bdf
结果文件	网盘\Chapter14\diancijiare.wbpj

14.2.1 问题描述

一个 GIS 母线单位长度的模型如图 14-1 所示，其相关尺寸见表 14-1，求当内部的铜导体通过 4000A 的交变电流、频率为 50Hz 时，GIS 母线内部的流场及温度场分布情况，外壳材质为铝。



图 14-1　几何模型

表 14-1　GIS 母线基本参数

参数	尺寸	参数	尺寸
外壳外径/mm	605	内部导体外径/mm	120
外壳内径/mm	570	内部导体内径/mm	85
导体电流/A	4000	环境温度/℃	11.3
放置方式	水平		

14.2.2 软件启动与保存

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 17→Workbench 17 命令，启动 ANSYS Workbench 17.0，进入主界面。

Step2：保存工程文档。进入 Workbench 后，单击工具栏中的 Save As...（另存为）按钮，将文件保存为 diancijiare，单击 Getting Started 窗口右上角的“关闭”按钮将其关闭。

注意：本节算例需要用到 ANSOFT Maxwell 17 软件，请读者进行安装。

由于 ANSOFT Maxwell 软件不支持保存路径中存在中文名，故在进行文档保存时，保存的路径不能含有中文字符，否则会发生错误。

14.2.3 建立电磁分析

Step1：创建电磁场分析。在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Analysis Systems 中单击 Maxwell 2D 并按住左键不放将其拖曳到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 Excel 表格的工程分析流程项目 A，如图 14−2 所示。

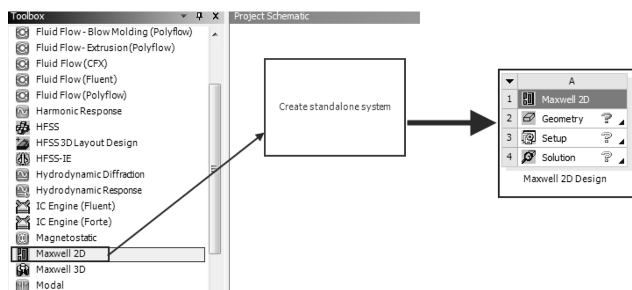


图 14−2　创建电磁分析环境

提示：工程分析流程项目 A 的 A1 到 A4 即是 Maxwell 3D 软件前处理、计算及后处理的三个过程。

Step2：打开 Maxwell 2D 软件。在项目 A 的 A2：Geometry 项中单击右键，弹出图 14−3 所示的快捷菜单，在快捷菜单中选择 Edit 命令启动 Maxwell 2D 软件，如图 14−4 所示。

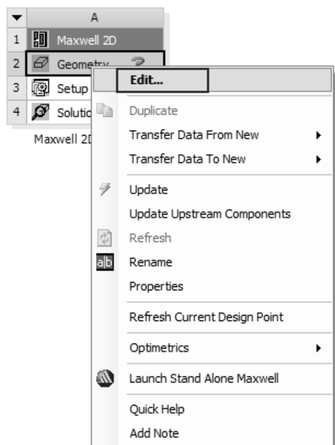


图 14−3　启动 Maxwell

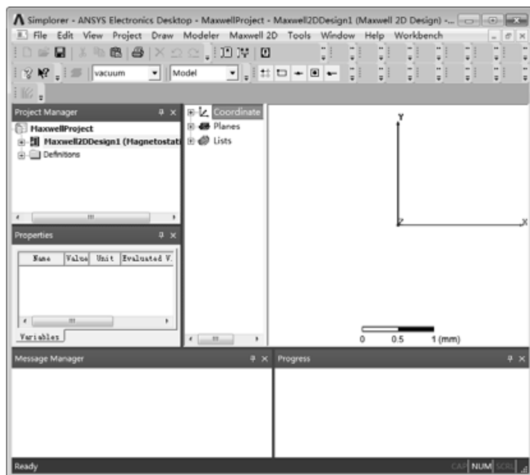


图 14−4　Maxwell 界面

提示：在工程分析流程项目A中直接双击A2栏Geometry项也可启动Maxwell 2D软件。

Step3：设置求解器。选择菜单栏中的 Maxwell 2D→Solution Type 命令，在弹出的图 14−5 所示的设置对话框中做如下设置：在 Geometry Mode 栏中选择 Cartesian XY 选项，由于 GIS 母线类似于水平直管路结构，每个断面的结构都是同心的空心圆柱，所以这里选择二维平面分析；在 Magnetic 选项中选择 Eddy Current 单选按钮，并单击 OK 按钮。

Step4：设置单位。依次选择 Modeler→Units 菜单，在弹出的图 14−6 所示的 Set Model Units 对话框中将单位设置成 mm，并单击 OK 按钮。

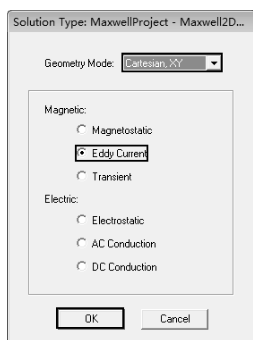


图 14−5　设置求解器类型

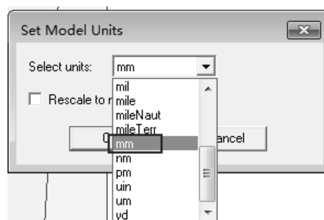


图 14−6　设置单位

14.2.4　几何模型建立

Step1：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建圆面，单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中输入 dX=40，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入，此时绘图区域生成图 14−7 所示的几何图形。

Step2：绘制几何模型。单击工具栏中的按钮创建圆面，单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中输入 dX=32.5，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入，此时绘图区域生成图 14−8 所示的几何图形。

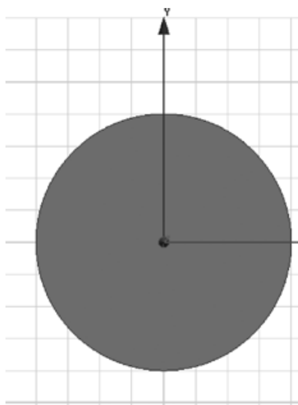


图 14−7　圆面 1

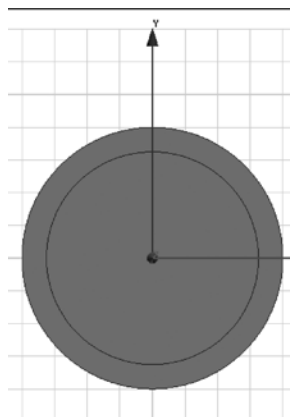


图 14−8　圆面 2

Step3：绘制几何模型。单击工具栏中的○按钮创建圆面，单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中输入 dX=302.5，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入，此时绘图区域生成图 14–9 所示的几何图形。

Step4：绘制几何模型。单击工具栏中的○按钮创建圆面，单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中输入 dX=285，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入，此时绘图区域生成图 14–10 所示的几何图形。

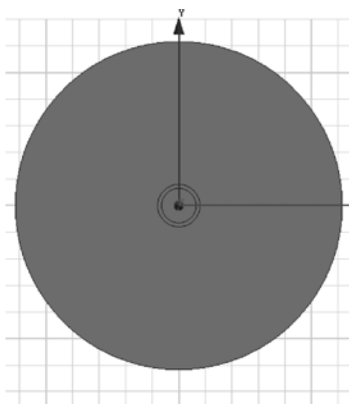


图 14–9 圆面 3

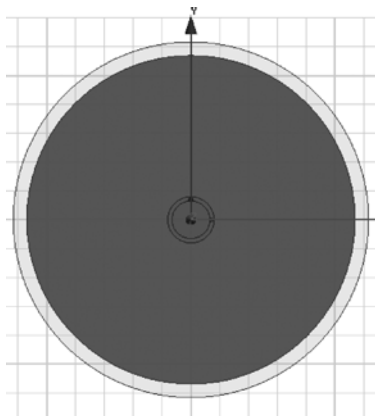


图 14–10 圆面 4

Step5：布尔运算。先选择半径为 40mm 的圆面（名称为 Circle1），按住键盘上的〈Ctrl〉键，再选择半径为 32.5mm 的圆面（名称为 Circle2），并单击工具栏中的按钮进行布尔运算中的差值运算，此时将弹出图 14–11 所示的对话框，在对话框中已经将两个几何体填入到相应的栏中，即 Circle1 在 Blank Parts 栏中，Circle2 在 Tool Parts 栏中，直接单击 OK 按钮即可。

注：选择上述两个圆面时的顺序一定需要引起读者注意，如果选择时顺序反了，那么就会出现图 14–12 所示的情况，即Circle2 在Blank Parts栏中，Circle1 在Tool Parts栏中，此时单击Circle2，中间的-->按钮会被加亮，然后单击这个按钮，此时Circle2 将被移动到Tool Parts栏中，如图 14–13 所示；以同样的操作，单击<--按钮，Circle1 将被移动到Blank Parts栏中，如图 14–14 所示。

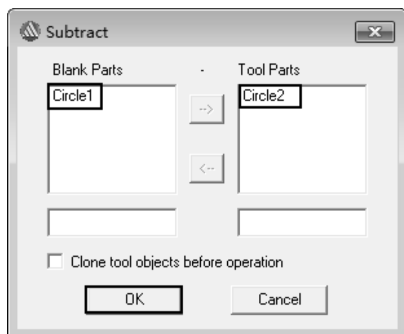


图 14–11 对话框 1

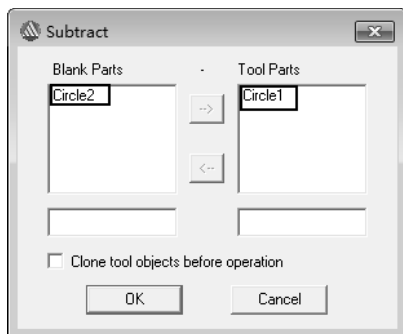


图 14–12 对话框 2



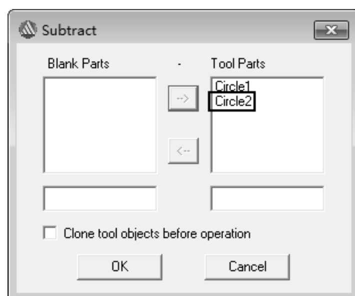


图 14–13　对话框 3

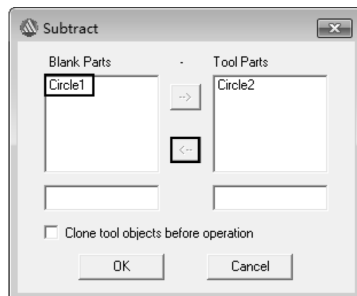


图 14–14　对话框 4

Step6：布尔运算。先选择半径为 302.5mm 的圆面（名称为 Circle3），按住键盘上的〈Ctrl〉键，再选择半径为 285mm 的圆面（名称为 Circle4），并单击工具栏中的按钮进行布尔运算中的差值运算，此时将弹出图 14–15 所示的对话框，在对话框中已经将两个几何体填入到相应的栏中，即 Circle3 在 Blank Parts 栏中，Circle4 在 Tool Parts 栏中，直接单击 OK 按钮即可，此时绘图窗口中的几何如图 14–16 所示。

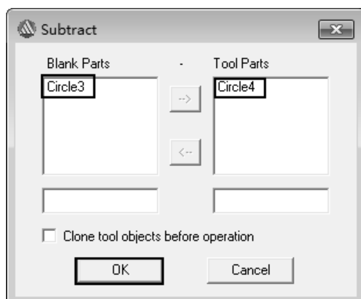


图 14–15　对话框 5

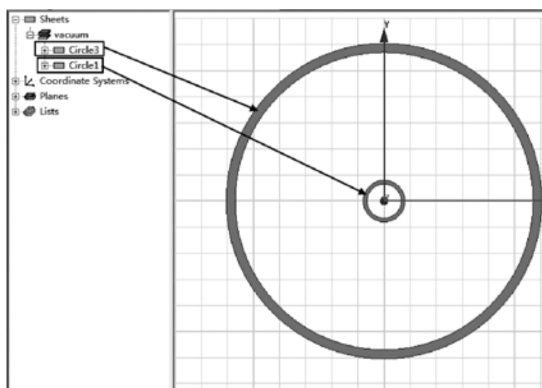


图 14–16　图示

Step7：几何体命名。选择名称为 Circle1 的几何体，在左下侧图 14–17 所示的 Properties 面板的 Name 栏中输入 copper，此时 Sheets 栏中 Circle1 的名称变成 copper。

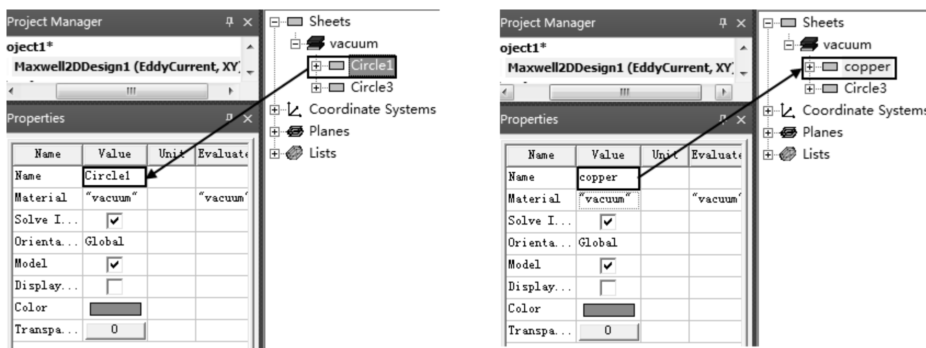


图 14–17　命名 1

Step8：几何体命名。选择名称为 Circle3 的几何体，在左下侧图 14-18 所示的 Properties 面板的 Name 栏中输入 aluminium，此时 Sheets 栏中 Circle3 的名称变成 aluminium。

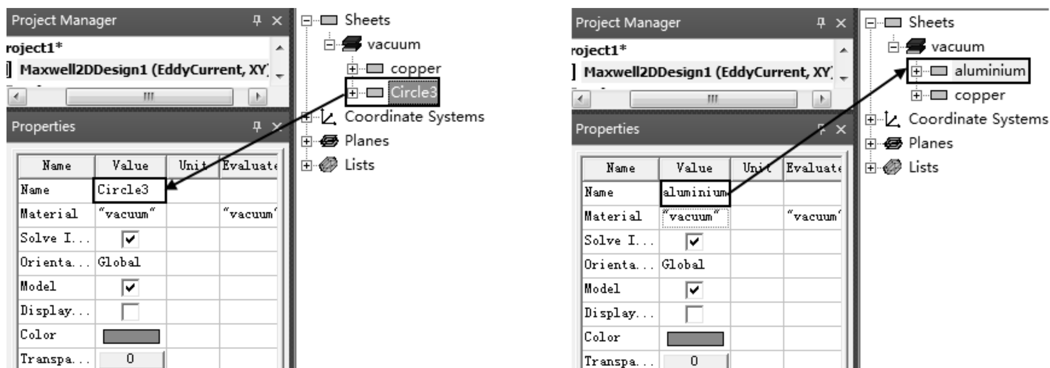


图 14-18　命名 2

14.2.5 求解域的设置

单击工具栏中的 ◯ 按钮创建圆面，单击绘图区域的坐标原点，然后在右下角出现的相对坐标长度输入栏中输入 dX=2000，dY=0，dZ=0，并按〈Enter〉键完成坐标输入，

此时绘图区域生成图 14-19 所示的圆面，此圆面作为电磁仿真的计算域，在 Sheets 栏中单击 Circle 5，在左侧出现的 Properties 设置面板中单击 Transparency，然后将滑块移动到右侧 1 的位置，单击 OK 按钮，此时计算域将变成透明状态。

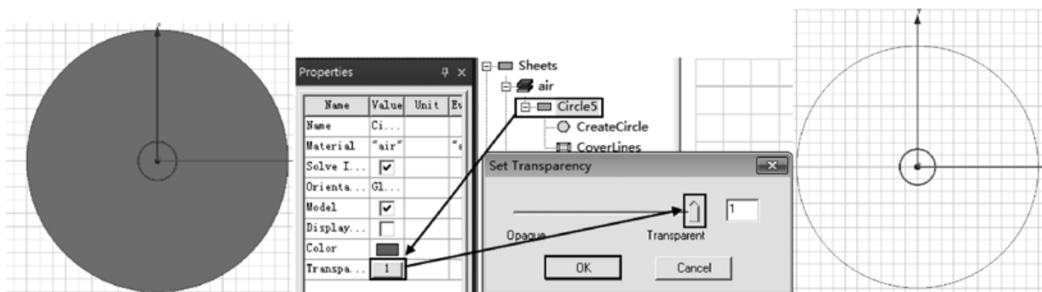


图 14-19　计算域

14.2.6 创建并赋材料

Step1：右键选择 aluminum 选项，在弹出的图 14-20 所示的快捷菜单中选择 Assign Material 选择。

在出现的 Select Definition 对话框的 Search by Name 栏中输入 Al，此时可以在下面的材料库中将 Al 开头的所有材料过滤出来，然后选择 aluminum，并单击“确定”按钮，如图 14-21 所示。

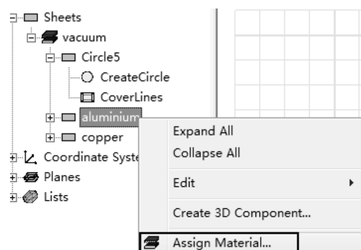


图 14-20　快捷菜单 1

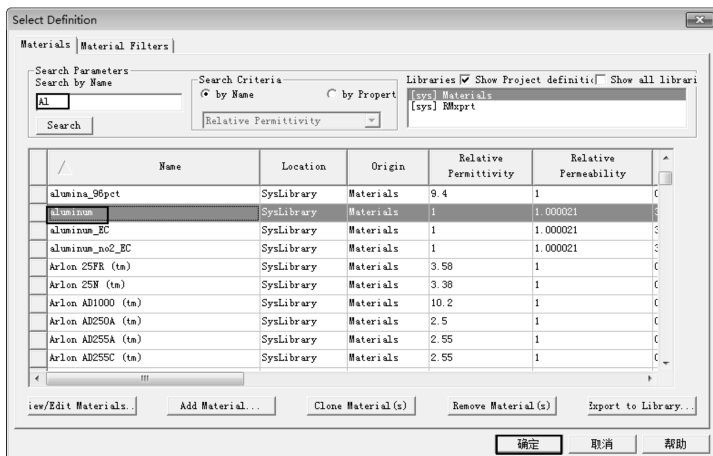


图 14-21　选择材料 1

Step2：右键选择 copper 选项，在弹出的图 14-22 所示的快捷菜单中选择 Assign Material 选项。

在出现的 Select Definition 对话框的 Search by Name 栏中输入 co，此时可以在下面的材料库中将 co 开头的所有材料过滤出来，然后选择 copper，并单击“确定”按钮，如图 14-23 所示。

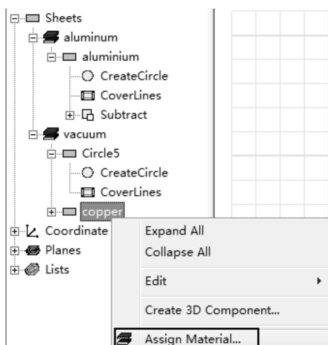


图 14-22　快捷菜单 2

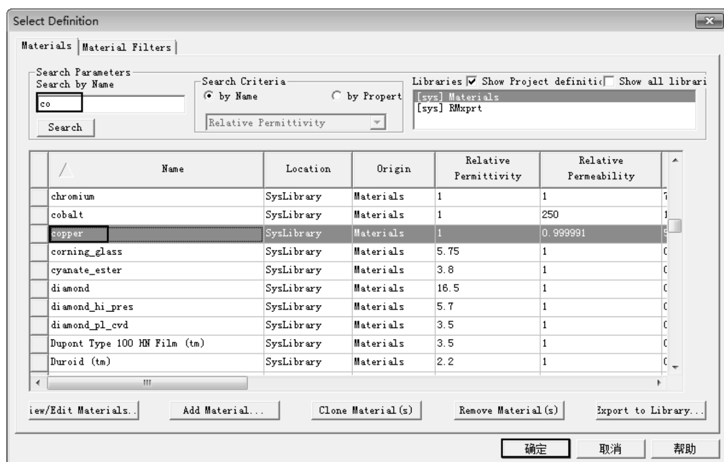


图 14-23　选择材料 2

Step3：右键选择 Circle5 选项，在弹出的图 14-24 所示的快捷菜单中选择 Assign Material。

在出现的 Select Definition 对话框的 Search by Name 栏中输入 air，此时可以在下面的材料库中将 air 开头的所有材料过滤出来，然后选择 air，并单击“确定”按钮，如图 14-25 所示。

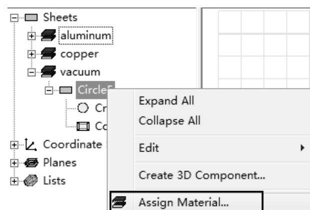


图 14–24　快捷菜单 3

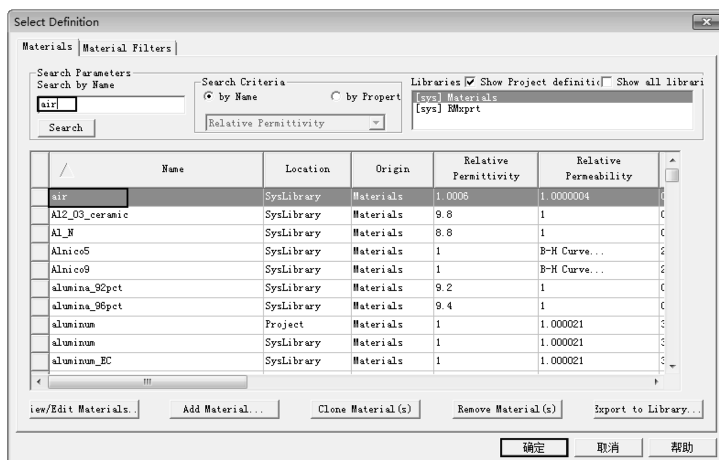


图 14–25　选择材料 3

14.2.7　添加激励

Step1：创建激励。选择图 14–26 所示的 copper 线圈截面，单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Assigned Excitation→Current 命令，此时弹出图 14–27 所示的 Current Excitation 对话框，在该对话框的 Value 中输入 4000，单位选择 A，单击“确定”按钮，完成参数的设置。

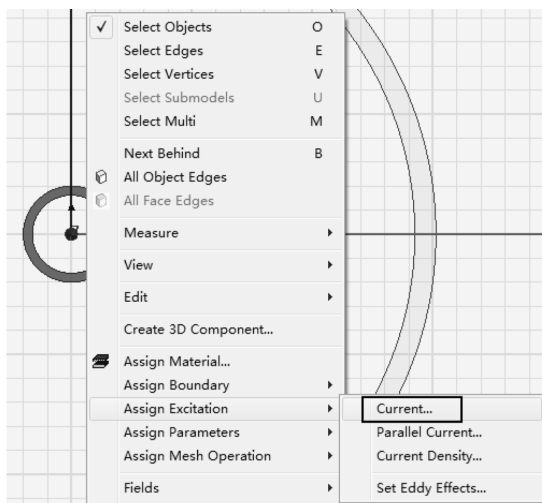


图 14–26　创建激励

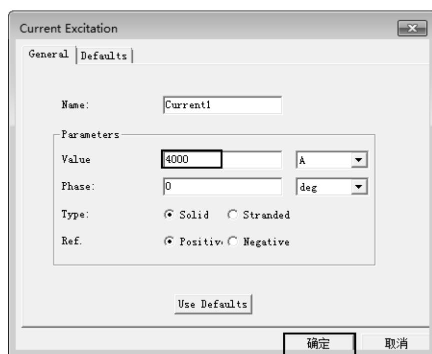


图 14–27　设置激励数值

Step2：在绘图窗口中右键单击任意位置，在弹出的快捷菜单中依次选择 Assign Excitation→Set Eddy Effects 命令，此时弹出图 14–28 右侧所示的对话框，在对话框中勾选 copper 和 aluminum 实体后的复选框，并单击 OK 按钮。

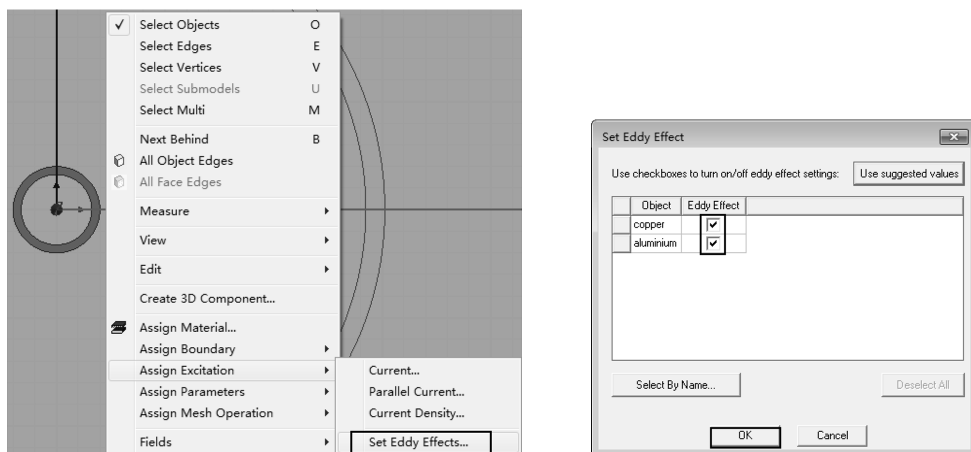


图 14−28　设置涡流效应

14.2.8　分析步创建

Step1：添加一个分析步。在 Project Manager 中的 Analysis 上单击右键，在弹出的快捷菜单中选择图 14−29 所示的 Add Solution Setup 命令，此时弹出图 14−30 所示的 Solve Setup 对话框，切换到 Solver 选项卡，设置 Adaptive Frequence 为 50，单位为 Hz，其余默认即可，单击“确定”按钮，此时在 Analysis 下会出现一个 Setup1 命令。

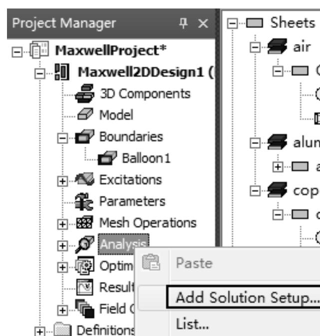


图 14−29　添加一个分析步



图 14−30　分析步参数设置

Step2：选择 copper 和 aluminum 实体并单击右键，在弹出的图 14−31 所示的快捷菜单中依次选择 Assign Mesh Operation→On Selection→ Skin Depth Based 命令。

Step3：在弹出的 Skin Depth Based Refinement 对话框中作如下设置：单击 Calculate Skin Depth 按钮，在弹出的 Calculate Skin Depth 对话框中输入频率为 50，单位选择 Hz，单击 OK 按钮，然后单击 Skin Depth Based Refinement 对话框中的 OK 按钮完成肌肤深度的设置，如图 14−32 所示。

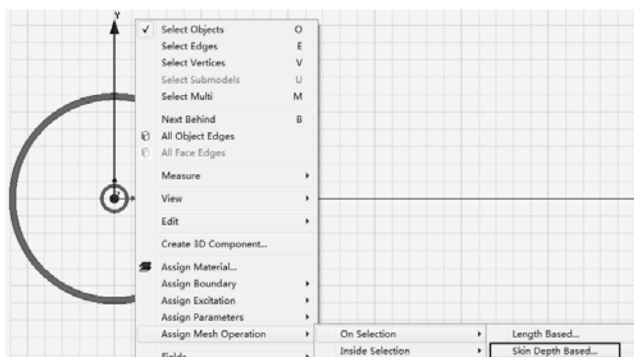


图 14-31　快捷菜单 1

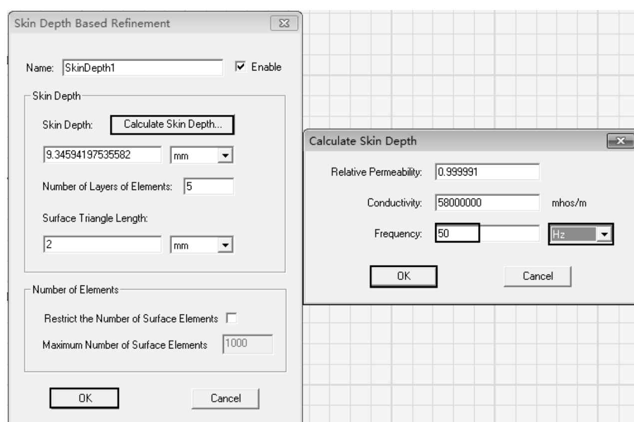


图 14-32　肌肤深度设置

Step4：选中所有并单击右键，在弹出的图 14-33 所示的快捷菜单中依次选择 Assign Mesh Operation→Inside Selection→ Length Based 命令。

Step5：弹出图 14-34 所示的 Element Length Based Refinement 对话框，在 Maximum Length of Elements 中输入 50，并单击 OK 按钮。



图 14-33　快捷菜单 2

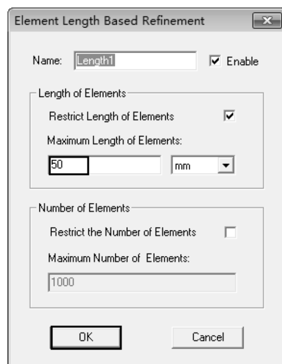


图 14-34　网格设置

Step6：右键选择 Setup，在弹出的图 14-35 所示的快捷菜单中选择 Apply Mesh Operations 命令，执行网格划分操作。

Step7：划分完成后，框选所有然后单击右键，在弹出的图 14–36 所示的快捷菜单中选择 Plot Mesh 命令。

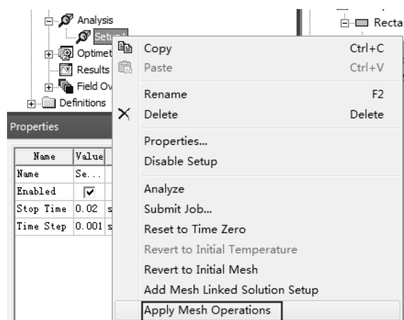


图 14–35　快捷菜单 3

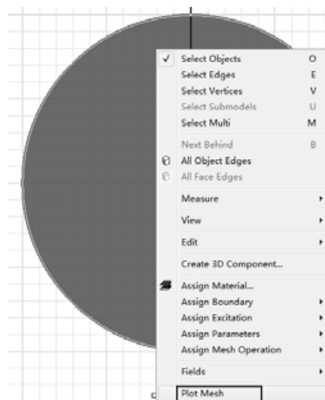


图 14–36　网格显示

Step8：图 14–37 所示为划分网格后的网格图，左侧的图为计算域的网格大小图，右侧的图为零件等的网格尺寸图。

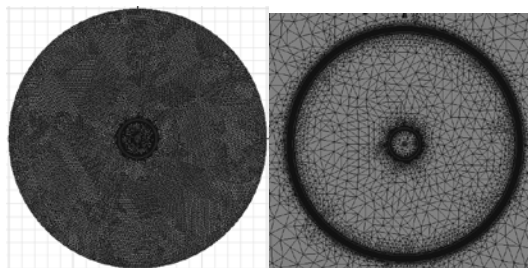
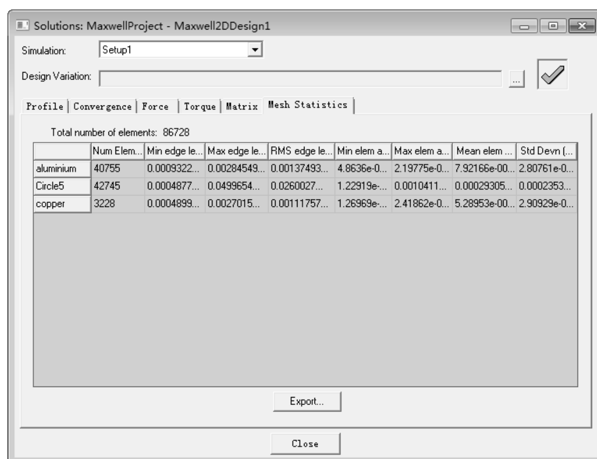


图 14–37　网格

Step9：此外，单击工具栏中的按钮将弹出图 14–38 所示的对话框，在对话框的 Mesh Statistics 选项卡中显示出不同结构的网格数量及网格大小。



	Num Elem...	Min edge le...	Max edge le...	RMS edge le...	Min elem a...	Max elem a...	Mean elem ...	Std Devn (...
aluminium	40755	0.0009322...	0.00284549...	0.00137493...	4.8636e-0...	2.19775e-0...	7.92166e-00...	2.80761e-0...
Circle5	42745	0.0004877...	0.0499654...	0.0260027...	1.22919e-...	0.0010411...	0.00029305...	0.0002353...
copper	3228	0.0004899...	0.0027015...	0.00111757...	1.26969e-...	2.41862e-0...	5.28953e-00...	2.90929e-0...

图 14–38　网格统计

14.2.9 模型检查与计算

经过上面的操作步骤，有限元分析的前处理工作全部结束，为了保证求解能顺利完成，需要先检查一下前处理的所有操作是否正确。

Step1：模型检查。单击工具栏上的按钮，出现图 14-39 所示的对话框，绿色对号说明前面的基本操作步骤没有问题。

注意：如果出现了⊗，说明前处理过程中某些步骤有问题，请根据右侧的提示信息进行检查。

Step2：求解计算。右键单击 Project Manager 中的 Analysis→Setup1 命令，在弹出的快捷菜单中选择图 14-40 所示的 Analyze 命令，进行求解计算，求解需要一定的时间。

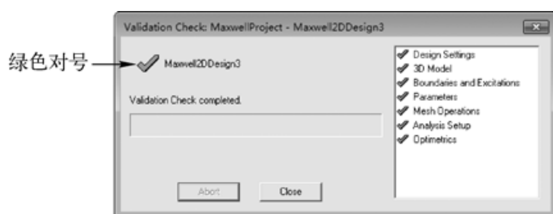


图 14-39 模型检查

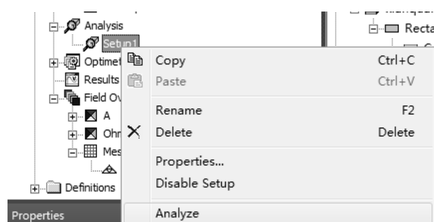


图 14-40 求解模型

14.2.10 后处理

Step1：磁场分布。求解完成后，选中全部，单击右键，在弹出图 14-41 所示的快捷菜单中选择 Fields→H→Mag_H 命令，此时弹出图 14-42 所示的 Create Field Plot 对话框。

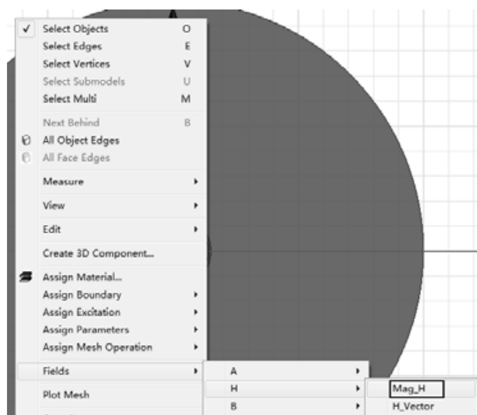


图 14-41 后处理操作

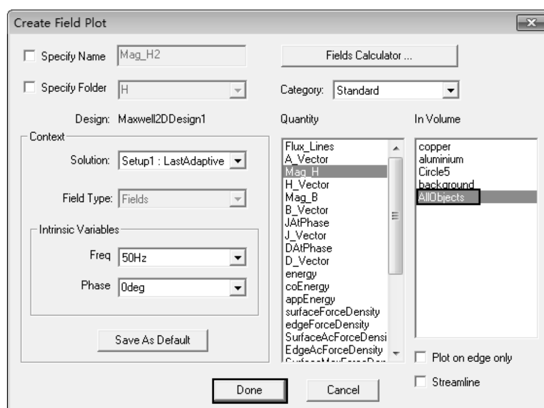


图 14-42 选择后处理实体

Step2：在 Create Field Plot 对话框中的 Quantity 栏中选择 Mag_H，在 In Volume 栏中选择 AllObjects。经过一段时间的计算，显示出图 14-43 所示的磁场分布云图。

右键选择 Field Overlap，在弹出的图 14-44 所示的快捷菜单中选择 Calculator 选项。



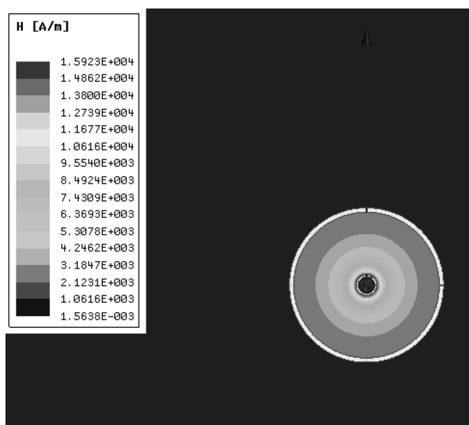


图 14−43　磁场分布云图

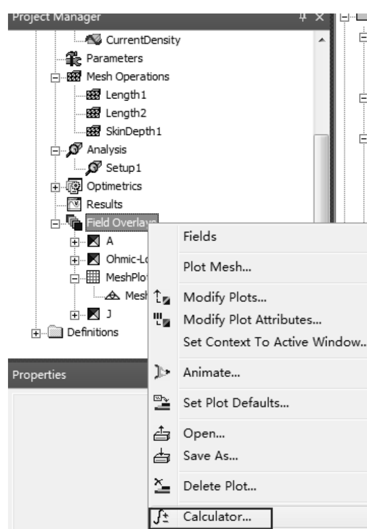


图 14−44　快捷菜单 1

Step3：在弹出的图 14−45 所示的 Fields Calculator 面板中作如下设置：在 Quality 栏中选择 OhmicLoss 选项；在 Geometry 栏中选择 aluminum 对应的名称，单击 OK 按钮；单击∫按钮，再单击 Eval 按钮，此时完成当前时刻的损耗计算。此时可以看出，经过计算后的 aluminum 几何的损耗为 9.16435917285307w/m。

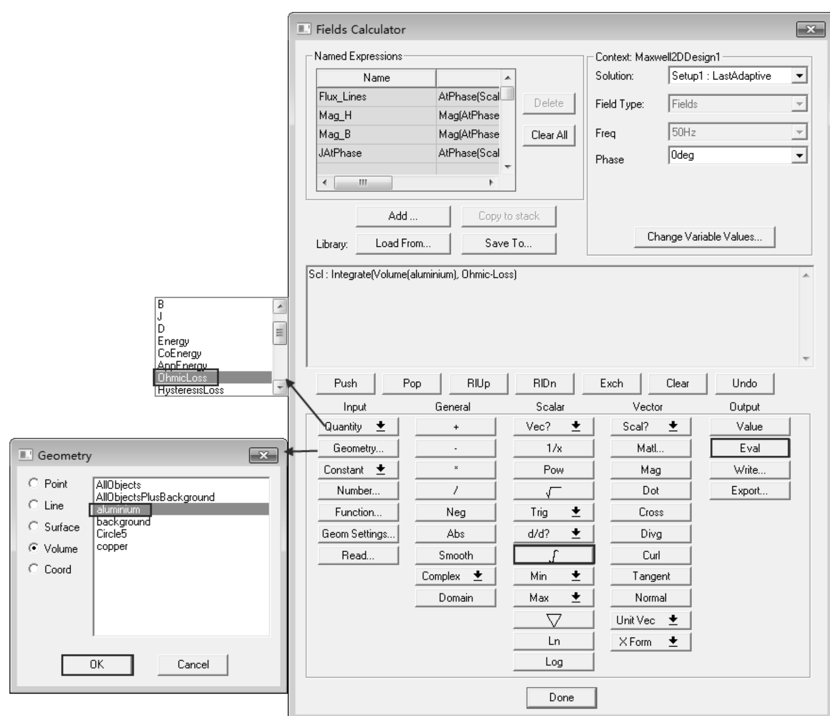


图 14−45　计算器

Step4：选中所有几何，右键选择 Field Overlap，在弹出的图 14-46 所示的快捷菜单中依次选择 Fields→B→B_Vector 选项。

Step5：在图 14-47 所示的 Create Field Plot 对话框中在 Quantity 栏中选择 B_Vector，在 In Volume 栏中选择 AllObjects。经过一段时间的计算，显示出图 14-48 所示的磁密分布矢量图。

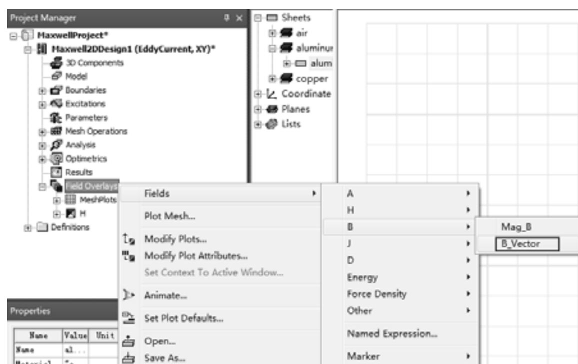


图 14-46 快捷菜单 2

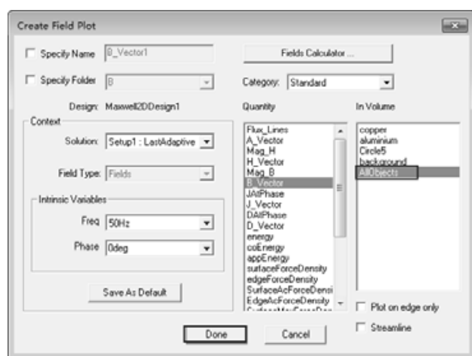


图 14-47 选择后处理实体

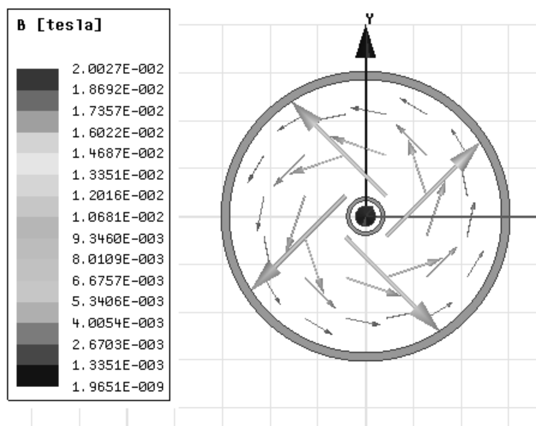


图 14-48 磁密分布矢量图

Step6：单击（保存）按钮，保存文件，然后单击（关闭）按钮关闭 Maxwell 2D 软件，返回到 Workbench 主窗口。

14.2.11 创建几何数据共享

Step1：回到 Workbench 窗口中，添加图 14-49 所示的 Fluid Flow（Fluent）流程，并单击项目 A 中的 A4：Solution 项，将其直接拖曳到项目 B 中的 B4：Setup 项，此时将在 A4 栏和 B4 栏之间创建一条连接线，表示 A4 栏中的结果数据传递到 B4 栏中作为激励。

右键选择 A2：Geometry 项，在弹出的图 14-50 所示的快捷菜单中依次选择 Import Geometry→Browse 选项。



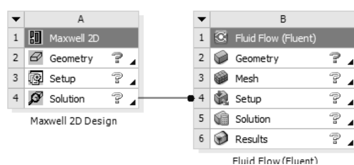


图 14-49　FEM 工具

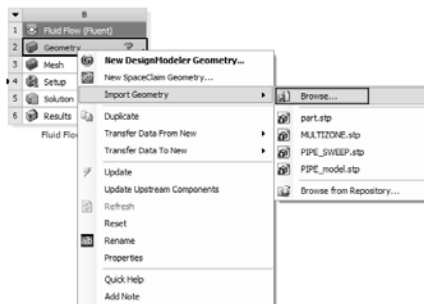


图 14-50　快捷菜单 1

Step2：此时将弹出图 14-51 所示的“打开”对话框，文件类型保持默认格式即可，然后选择 Geom 几何文件，单击“打开”按钮。

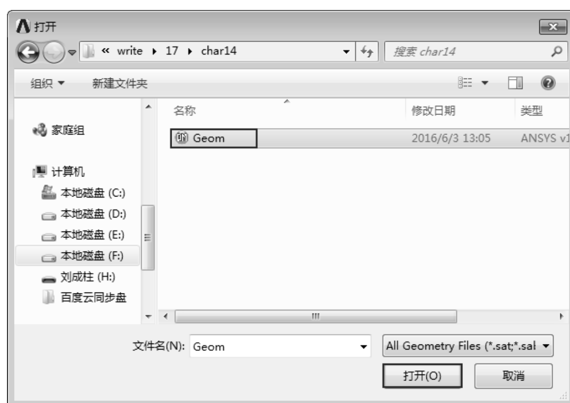


图 14-51 “打开”对话框

Step3：此时双击项目 B 中的 B2：Geometry 项，弹出图 14-52 所示的 DM 几何建模平台，在几何建模平台中可以看出三维几何模型已经被成功导入。

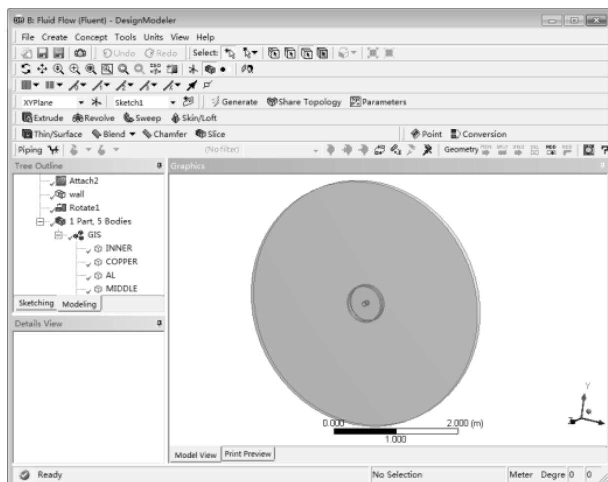


图 14-52　DM 平台

注：在做流体分析时，前处理中的几何与几何之间的面接触不能有连接属性，为了避免这种事情的发生，在建立几何时（无论是从外部几何文件中导入，还是在DM或者ANSYS SpaceClaim中建立），必须选中所有几何（特别是流体与固体相接处的几何），然后通过右键弹出的快捷菜单选择Form a new part命令，形成一个组件，这样在后续分析中就不会报错了。

Step4：关闭 DM 几何建模窗口，返回到 Workbench 平台中，双击项目 B 中的 B3：Mesh 项，此时将弹出图 14–53 所示的 ANSYS ICEM CFD 网格划分与属性设置窗口。

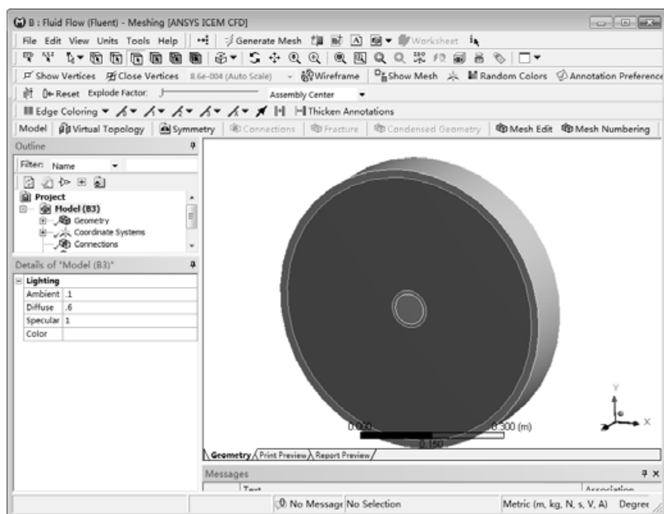


图 14–53　网格划分

Step5：固体属性设置。在 Outline 窗口中依次选择 Geometry→GIS 中的 COPPER 和 AL 两个几何模型，下面弹出图 14–54 所示的 Details of“Multiple Selection”详细设置面板，在 Material→Fluid/Solid 栏中选择 Solid 选项，将两个几何设置为固体结构。

Step6：流体属性设置。在 Outline 窗口中依次选择 Geometry→GIS 中的 INNER 和 MIDDLE 两个几何模型，下面弹出图 14–55 所示的 Details of“Multiple Selection”详细设置面板，在 Material→Fluid/Solid 栏中选择 Fluid 选项，将两个几何设置为流体结构。

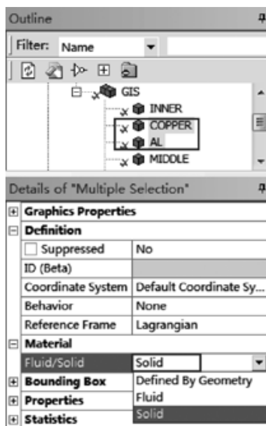


图 14–54　属性设置 1

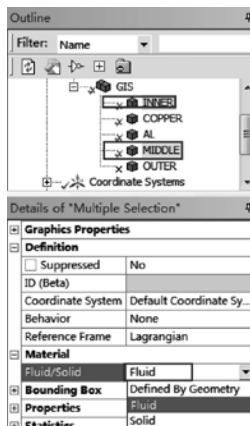


图 14–55　属性设置 2

Step7：网格设置。在 Outline 窗口中右键选择 Mesh，在弹出的图 14−56 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Sizing 选项，此时将在 Mesh 选项下面创建 Sizing 网格尺寸设置选项。

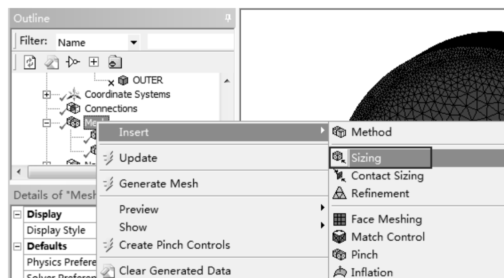


图 14−56　快捷菜单 2

Step8：在 Outline 窗口中选择 Mesh 下的 Body Sizing 选项，在下面出现的如图 14−57 所示的 Details of“Body Sizing”−Sizing 详细设置面板中作如下设置：在 Geometry 栏中确保几何名称为 COPPER 和 AL 的两个几何被选中，此时在 Geometry 栏中将出现 2Bodies 字样；在 Type→Element Size 栏中输入网格大小为 5.e−003m，其余保持默认即可。

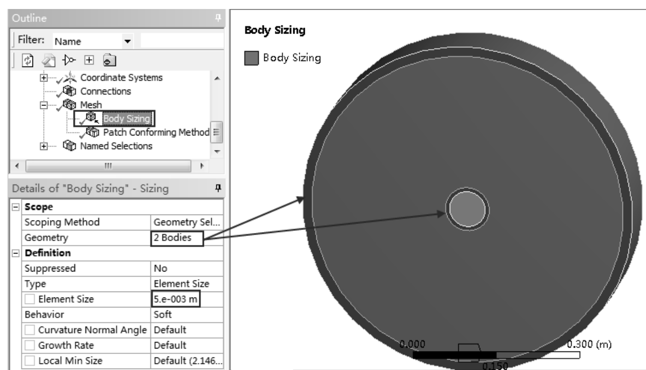


图 14−57　网格大小

Step9：网格设置。在 Outline 窗口中右键选择 Mesh，在弹出的图 14−58 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Method 选项，此时将在 Mesh 选项下面创建 Method 网格尺寸设置选项。

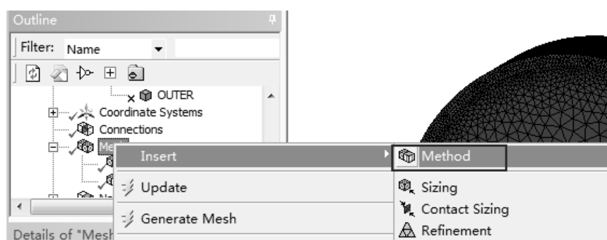


图 14−58　快捷菜单 3

Step10：在 Outline 窗口中选择 Mesh 下的 Automatic Method 选项，下面出现图 14−59 所

示的 Details of “Automatic Method”详细设置面板中作如下设置：在 Geometry 栏中确保四个几何均被选中，此时在 Geometry 栏中将出现 4Bodies 字样；在 Definition→Method 栏选择 Tetrahedrons 选项，对所有几何进行四面体网格划分，其余保持默认即可，此时 Mesh 的 Automatic Method 选项将显示为 Patch Conforming Method。

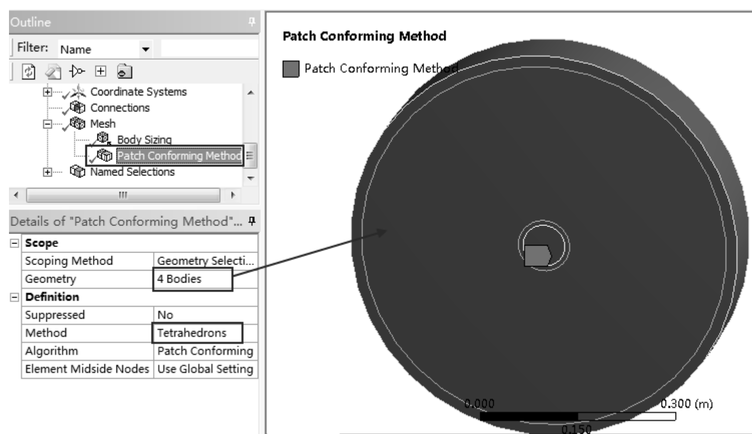


图 14-59　网格设置

Step11：在 Outline 窗口中右键选择 Mesh，在弹出的图 14-60 所示的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时将开始进行网格划分，最终划分完的网格如图 14-61 所示。

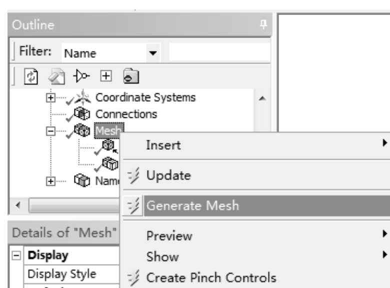


图 14-60　快捷菜单 4

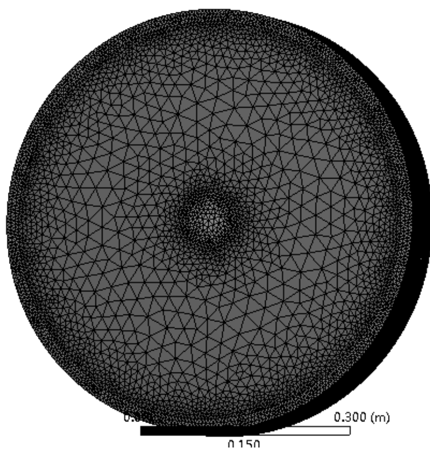


图 14-61　网格划分

Step12：在绘图窗口中选择所有几何实体的一个侧面，在弹出的快捷菜单中选择 Create Named Selection 选项，如图 14-62 所示。

Step13：在弹出的 Selection Name 对话框中输入 Selection，如图 14-63 所示。

Step14：在绘图窗口中选择所有几何实体的另一个侧面，在弹出的快捷菜单中选择 Create Named Selection 选项，如图 14-64 所示。

Step15：在弹出的 Selection Name 对话框中输入 Selection1，如图 14-65 所示。

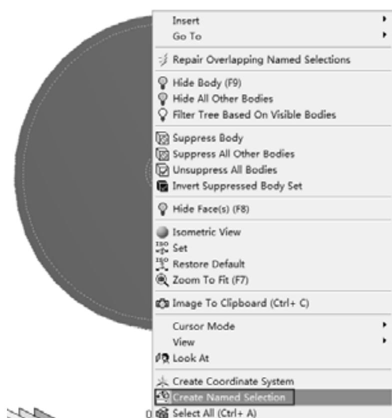


图 14-62　快捷菜单 5

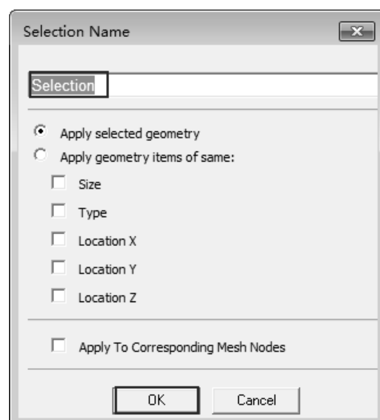


图 14-63　命名 1

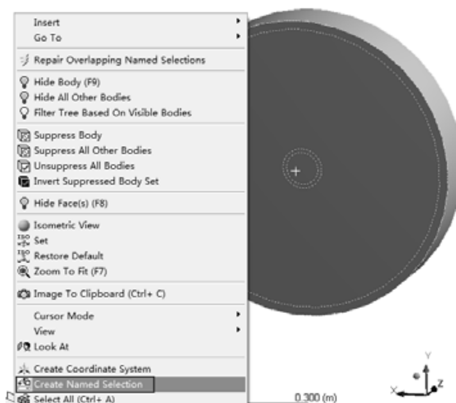


图 14-64　快捷菜单 6

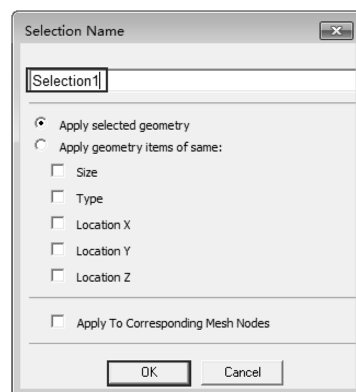


图 14-65　命名 2

Step16：在绘图窗口中选择所有几何实体的外表面，在弹出的快捷菜单中选择 Create Named Selection 选项，如图 14-66 所示。

Step17：在弹出的 Selection Name 对话框中输入 wall，如图 14-67 所示。

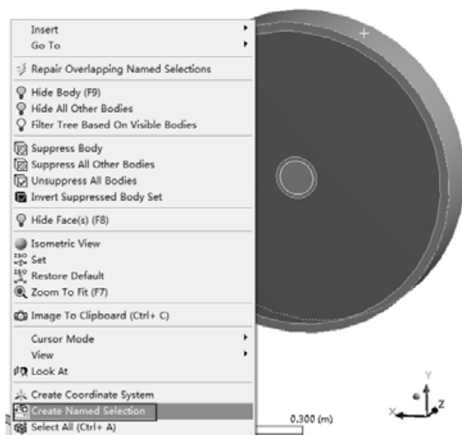


图 14-66　快捷菜单 7

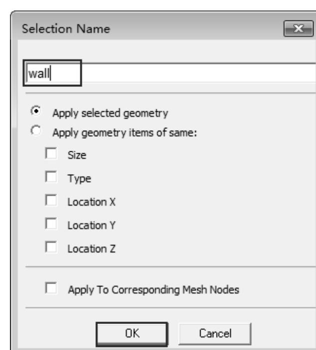


图 14-67　命名 3

Step18：此时在 Outline 窗口中单击 Named Selections 选项，在绘图窗口中将显示图 14-68

所示的所有命名的几何表面及属性。

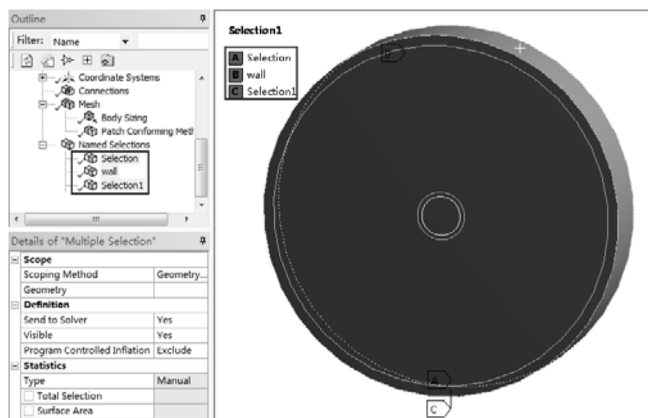


图 14−68 显示

Step19：关闭 Mesh 网格划分平台，在平台中右键选择项目 A 中的 A4：Solution 项，从弹出的快捷菜单中选择 Update 选项，执行数据更新操作，如图 14−69 所示，更新完成后如图 14−69 右侧流程图所示。

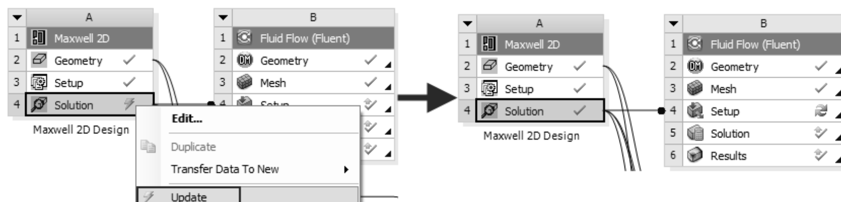


图 14−69 数据更新 1

Step20：在平台中右键选择项目 B 中的 B3：Mesh 项，从弹出的快捷菜单中选择 Update 选项，执行几何网格数据更新操作，如图 14−70 所示。

Step21：在平台中右键选择项目 B 中的 B4：Setup 项，此时弹出图 14−71 所示的 Fluent 启动界面，在启动界面中进行如下设置：Option 中勾选 Double Precision 复选框，采用双精度计算；在 Processing Option 中选择 Parallel（Local Machine）单选按钮，采用并行计算格式；在 Solver Processes 中输入 2，表示采用两核进行计算，并单击 OK 按钮。

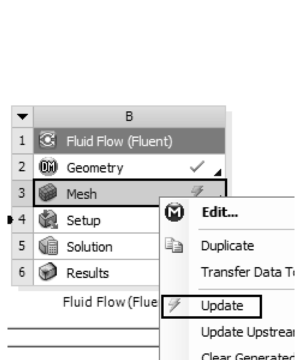


图 14−70 数据更新 2



图 14−71 Fluent 启动界面



Step22：此时弹出图 14−72 所示的 Fluent 操作与设置界面，界面的最左侧为 Setup 模型树区域，中间的区域为相关命令详细设置区域，右侧上面为图形界面，右侧下面为 TUI 界面。

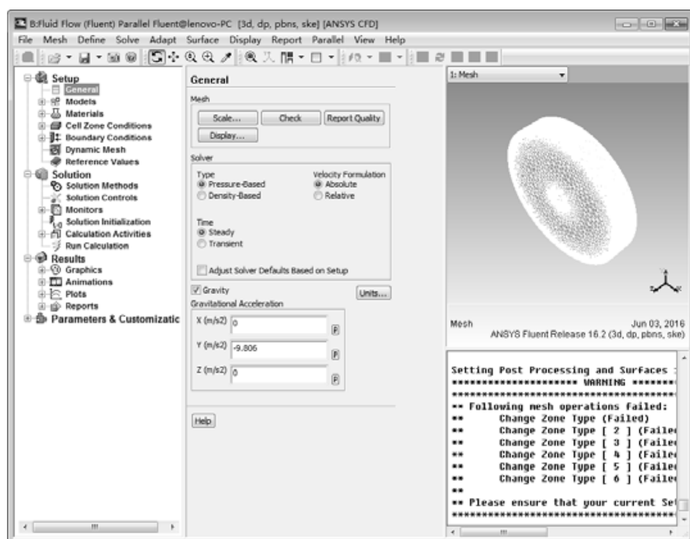


图 14−72　Fluent 界面

Step23：单击图 14−73 所示的 General 选项，此时在中间区域显示 General 详细设置面板，在面板中勾选 Gravity 复选框，然后在 Y 方向输入−9.806。

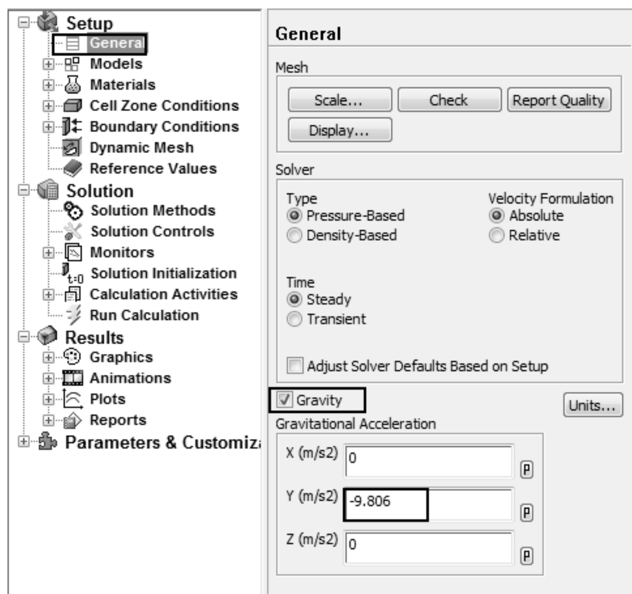


图 14−73　General 设置

Step24：双击图 14−74 所示的 Models→Energy 选项，此时弹出 Energy 详细设置面板，在其中勾选 Energy Equation 复选框，并单击 OK 按钮。

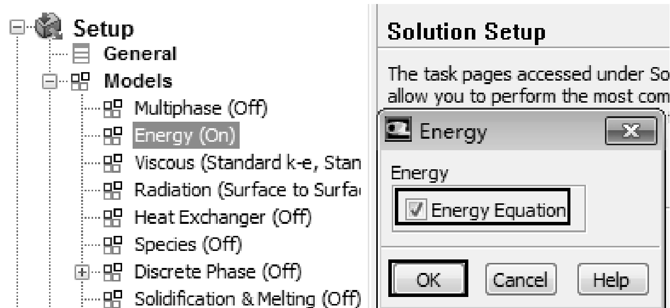


图 14−74 Energy 窗口

Step25：双击图 14−75 所示的 Models→Viscous 选项，此时在弹出的 Viscous Model 详细设置面板中作如下设置：在 Model 栏中选择 k−epsilon（2 eqn）单选按钮；在 k−epsilon Model 栏中选择 Standard 单选按钮；在 Near−Wall Treatment 栏中选择 Standard Wall Functions 单选按钮；在 Options 栏中勾选 Full Buoyancy Effects 复选框选项，并单击 OK 按钮。

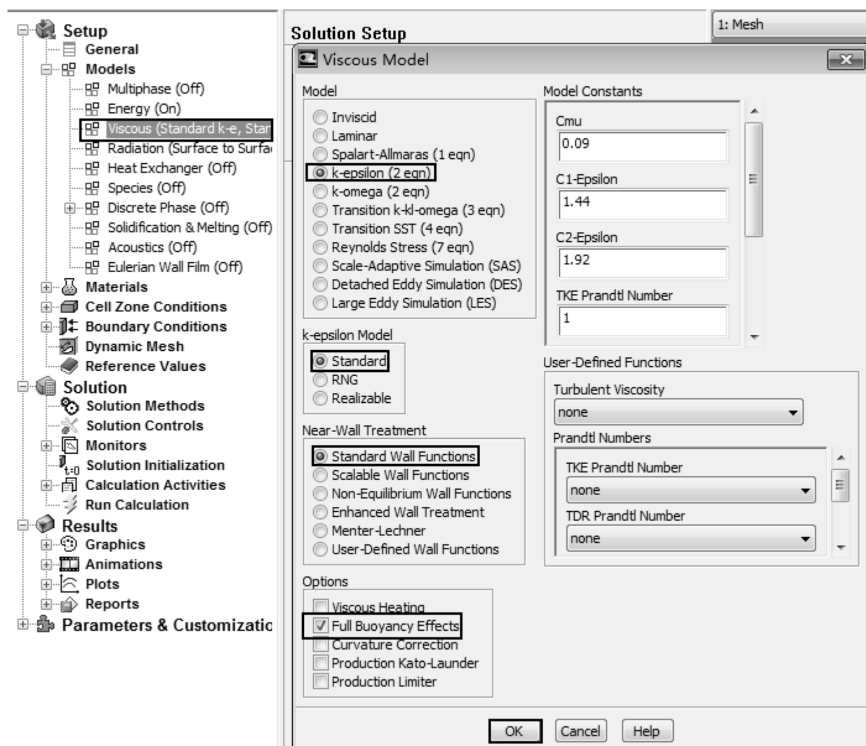


图 14−75 模型设置 1

Step26：双击图 14−76 所示的 Models→Radiation（Surface to Surface）选项，此时在弹出的 Radiation Model 详细设置面板中作如下设置：在 Model 栏中选择 Surface to Surface（S2S）单选按钮；在 View Factors and Clustering 栏中单击 Compute/Write/Read 按钮；在弹出的 Select File 对话框中保持几何文件名默认即可，单击 OK 按钮。

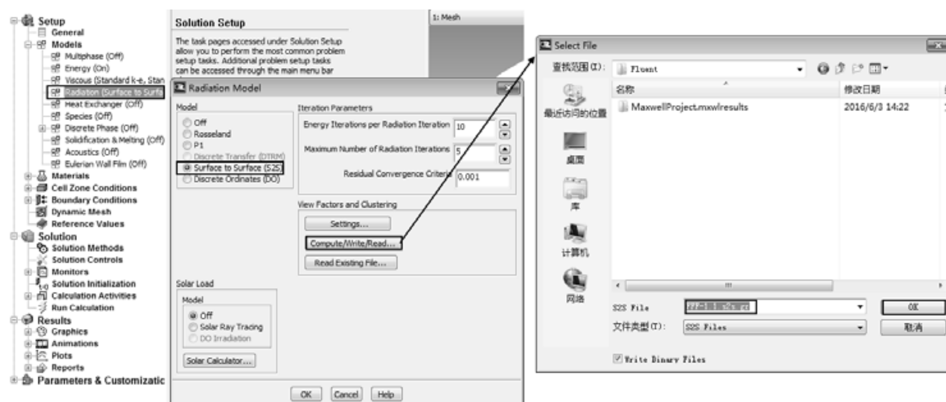


图 14-76　模型设置 2

此时在 Fluent 界面的右下角 TUI 窗口中显示部分计算过程，如图 14-77 所示，当出现 Completed 100% reading of view factor 字样时，表明辐射计算完成。

```
# Using MPI with 1 process...
# Using OpenMP with 4 processes...
#       0 lenovo-PC
# Read parameter section...
# Create BSP tree...
# Maximum tree depth = 20
# Calculate and write view factors...
#       100% done!
# CPU  time: 35.761 (s)
# Wall time: 36 (s)
Reading "\"| gunzip -c \"I:\writing\GIS\GISwensheng_files\dp0\FFF-1\Fluent\FFF-1.1.s2s.gz\"\""...

 Reading radiating clusters (20286) and view factor values from I:\writing\GIS\GISwensheng_files\dp0\FFF-1\Fluent\FFF-1.1.s2s.gz.

 Initialized VF Storage
Done.
The number of radiating surface clusters in the compute-node 0  is
6450
The number of radiating surface clusters in the compute-node 1  is
4602
The number of radiating surface clusters in the compute-node 2  is
4633
The number of radiating surface clusters in the compute-node 3  is
4601

Completed 100% reading of view factors
```

图 14-77　TUI 显示

Step27：双击图 14-78 所示的 Materials 选项，在中间 Materials 详细设置面板中作如下设置：Materials 栏中双击 Fluid 选项。

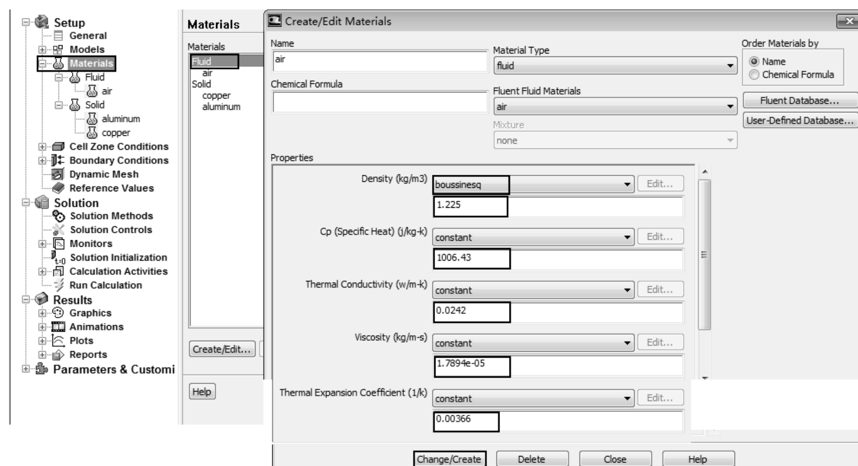


图 14-78　air 属性设置

在弹出的 Create/Edit Materials 窗口中作如下设置：在 Name 栏中输入 air 名称；在 Material Type 栏中选择 fluid 选项；在 Properties 栏的 Density 中选择 Boussinesq 选项，并输入密度为 1.225；在 Cp 栏中输入 1006.43；在 Thermal Conductivity 栏中输入 0.0242；在 Viscosity 栏中输入 1.7894e−05；在 Thermal Expansion Coefficient 栏中输入 0.00366，单击 Change/Create 按钮。

Step28：双击图 14−79 所示的 Materials 选项，此时在中间的 Materials 详细设置面板中作如下设置：Materials 栏中双击 solid 选项，在弹出的 Create/Edit Materials 对话框中单击右侧的 Fluent Database 按钮；在弹出的 Fluent Database Material 对话框的 Fluent Solid Materials 栏中选择 Copper（CU）选项，然后单击 Copy 按钮，再单击 Change/Create 按钮，此时 copper 材料将被添加到材料库中。

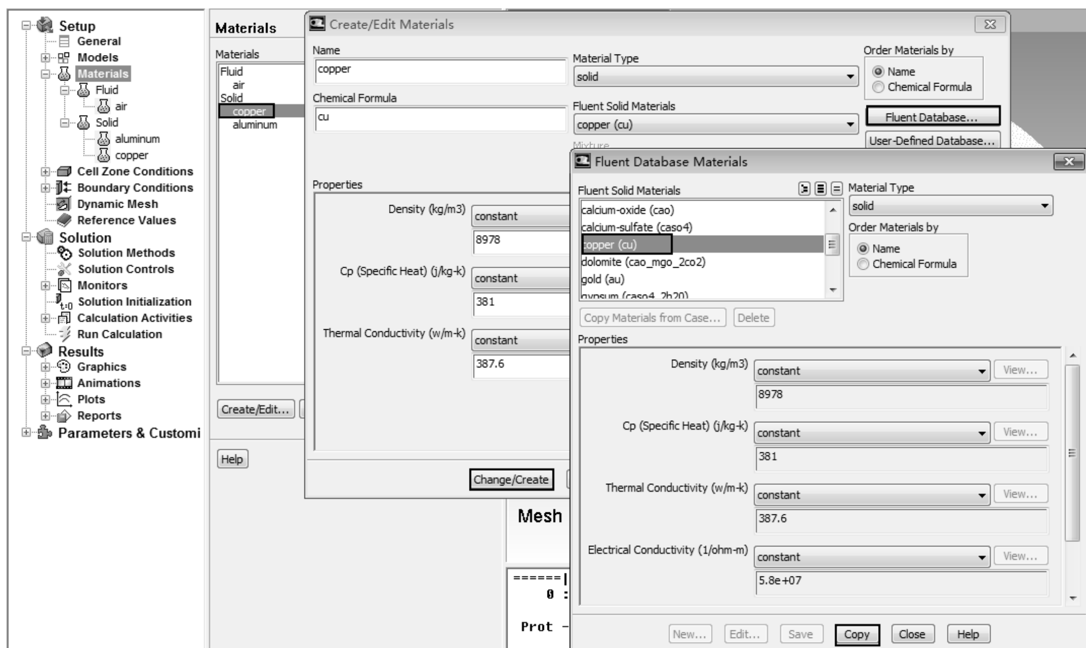


图 14−79 添加材料

Step29：双击图 14−80 所示的 Cell Zone Conditions 选项，此时在中间的 Cell Zone Conditions 详细设置面板中作如下设置：单击选中 gis−al 选项，然后单击 Edit 按钮，在弹出的 Solid 对话框的 Material Name 栏中选择材料为 aluminum，并单击 OK 按钮，完成材料设置。

Step30：双击图 14−81 所示的 Cell Zone Conditions 选项，在中间的 Cell Zone Conditions 详细设置面板中作如下设置：单击选中 gis−copper 选项，然后单击 Edit 按钮，在弹出的 Solid 对话框的 Material Name 栏中选择材料为 copper，并单击 OK 按钮，完成材料设置。



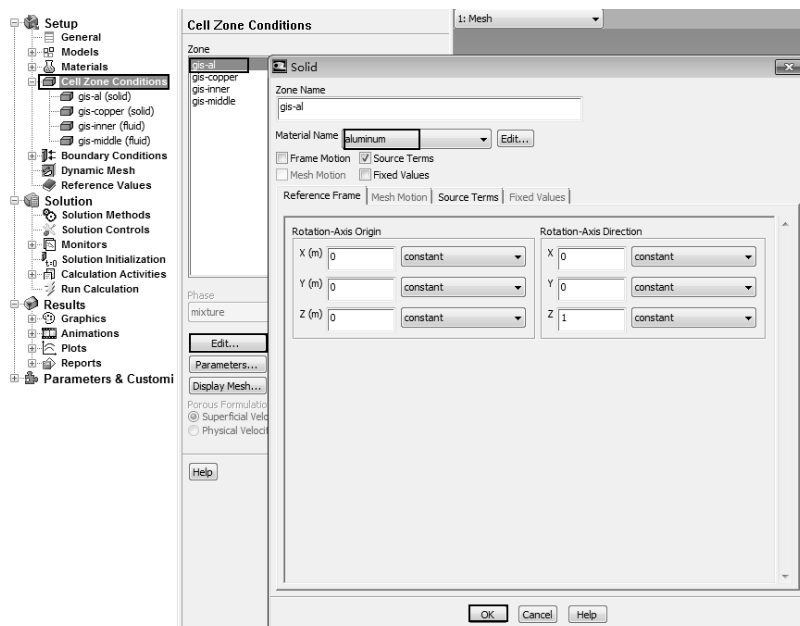


图 14-80　材料设置 1

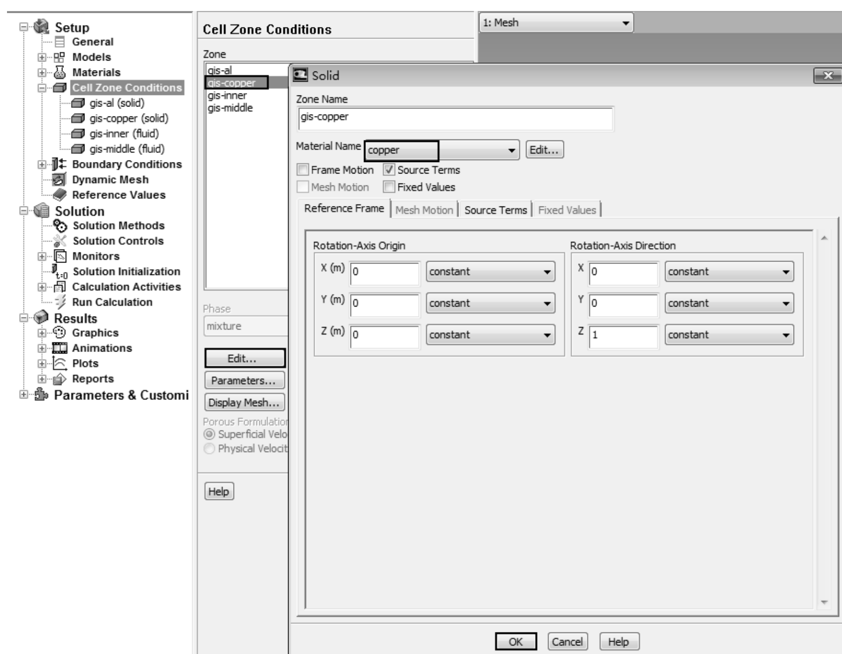


图 14-81　材料设置 2

Step31：双击图 14-82 所示的 Cell Zone Conditions 选项，在中间的 Cell Zone Conditions 详细设置面板中作如下设置：单击选中 gis-inner 选项，然后单击 Edit 按钮，在弹出的 Solid 对话框的 Material Name 栏中选择材料为 air，并单击 OK 按钮，完成材料设置。



图 14-82 材料设置 3

Step32：双击图 14-83 所示的 Cell Zone Conditions 选项，在中间的 Cell Zone Conditions 详细设置面板中作如下设置：单击选中 gis-middle 选项，然后单击 Edit 按钮，在弹出的 Solid 对话框的 Material Name 栏中选择材料为 air，并单击 OK 按钮，完成材料设置。

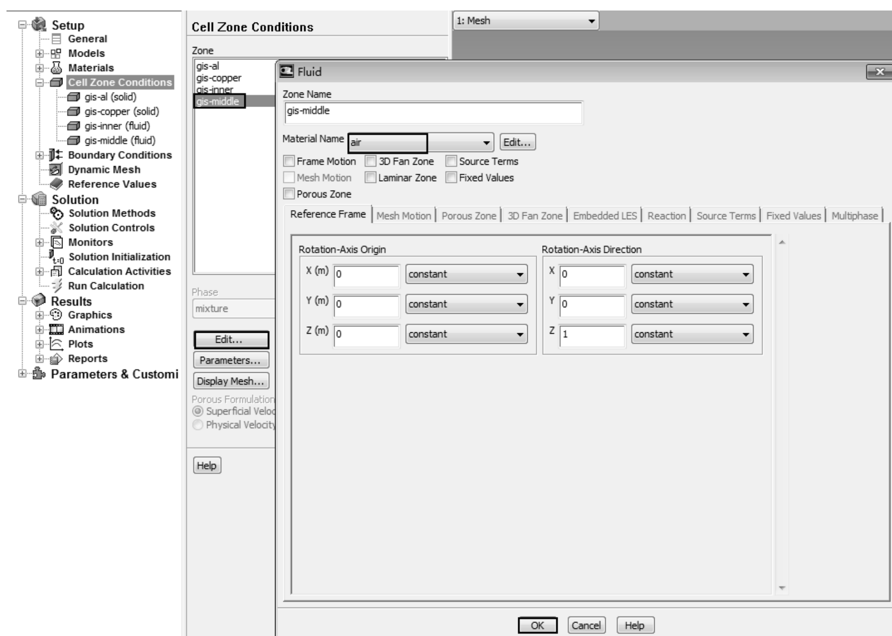


图 14-83 材料设置 4

Step33：单击图 14-84 所示的 Boundary Conditions 下面的 wall（wall）选项，此时在中间的 Boundary Conditions 详细设置面板中作如下设置：单击选中 wall 选项，并在 Type 栏中



选择 wall 选项，然后单击 Edit 按钮。

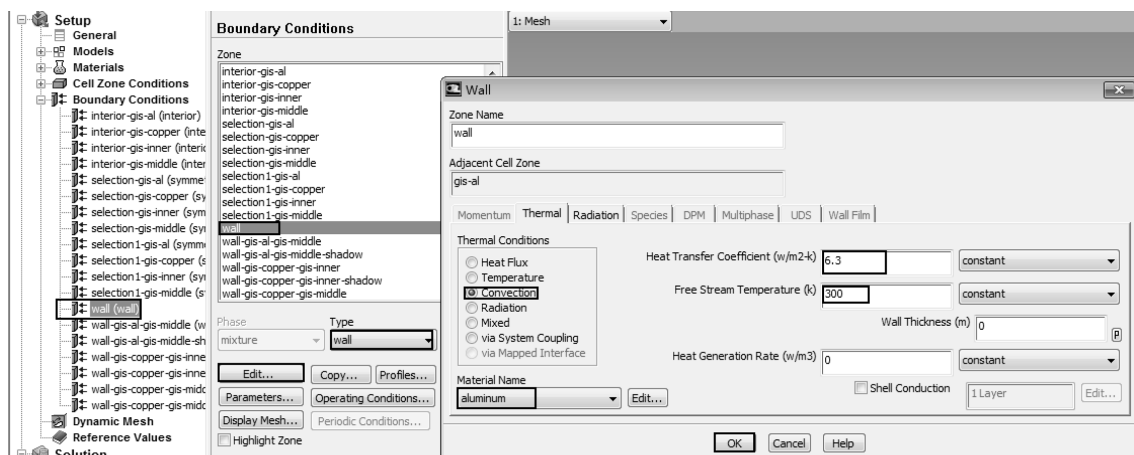


图 14-84　对流设置

在弹出的 Wall 对话框中作如下设置：切换到 Thermal 选项卡中；在 Thermal Conditions 栏中选择 Convection 单选按钮；在 Material Namen 栏中选择 aluminum 选项；在 Heat Transfer Coefficient 栏中输入 6.3；在 Free Stream Temperature 栏中输入 300，并单击 OK 按钮。

Step34：依次选择 File→EM Mapping→Volumetric Energy Source 选项，如图 14-85 所示，在弹出的 Maxwell Mapping Volumetric 对话框中选择 Fluent Cell Zones 栏下的 gis-al 和 gis-copper 两个几何，并单击 OK 按钮。

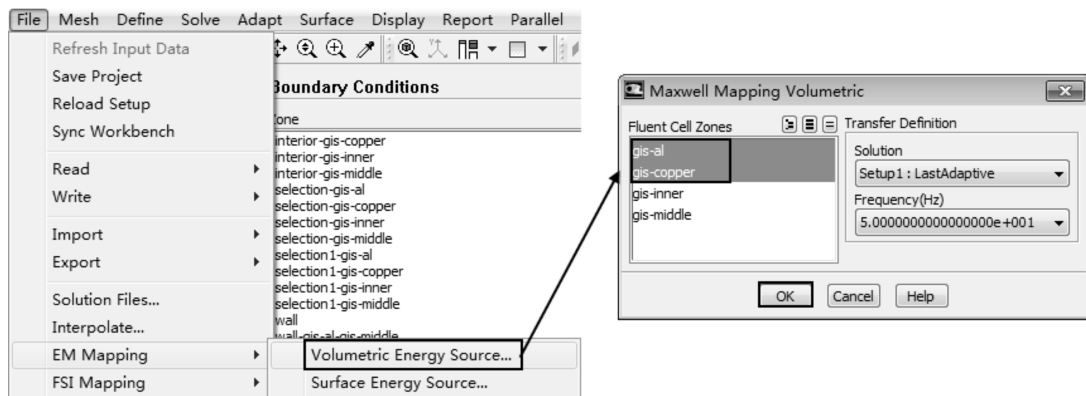


图 14-85　选择模型

Step35：在 TUI 提示窗口中显示 Fluent generated‘Input_to_Ansoft.xml’file successfully 字样，表示数据传递成功，此时经过一段时间的计算，在图 14-86 所示的 TUI 显示窗口中显示出计算结果。Maxwell 中计算的 aluminum 几何的损耗为 9.16435917285307w/m，在 Fluent 中建立的模型中导体的长度为 0.1m，所以计算出来 Fluent 中的损耗应该是 0.916435917285307w，这与图 14-86 中提示的 9.169e-01（Watt）一致。

```
  Fluent generated 'Input_to_Ansoft.xml' file successfully

  Launching C:\Program Files\AnsysEM\AnsysEM16.2\Win64\maxwell.exe ....
Reading EM loss file "loss-data-t4"


Data assigned to selected Fluent cell zones ...

        Total loss on zone    17 is  9.169e-01 (Watt)
        Total loss on zone    16 is  8.345e+00 (Watt)

        Total loss is :  9.2615e+00 (Watt)
```

图 14-86 计算与校核

Step36：双击 Solution 下的 Solution Methods 选项，在中间出现的如图 14-87 所示的 Solution Methods 详细设置面板中作如下设置：在 Scheme 栏中选择 SIMPLE 选项；在 Gradient 栏中选择 Least Squares Cell Based 选项；在 Pressure 栏中选择 Second Order 选项；在 Momentum 栏中选择 Second Order Upwind 选项；在 Turbulent Kinetic Energy 栏中选择 First Order Upwind 选项；在 Turbulent Dissipation Rate 栏中选择 First Order Upwind 选项。

Step37：双击 Solution 下的 Solution Initialization 选项，在中间出现的如图 14-88 所示的 Solution Initialization 详细设置面板中作如下设置：在 Initialization Methods 栏中选择 Standard Initialization 单选按钮；在 Compute from 栏中选择 all-zones 选项；并单击 Initialize 按钮进行初始化。

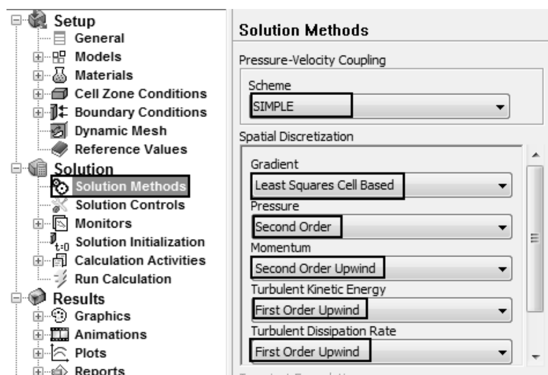


图 14-87 Solution Methods 设置

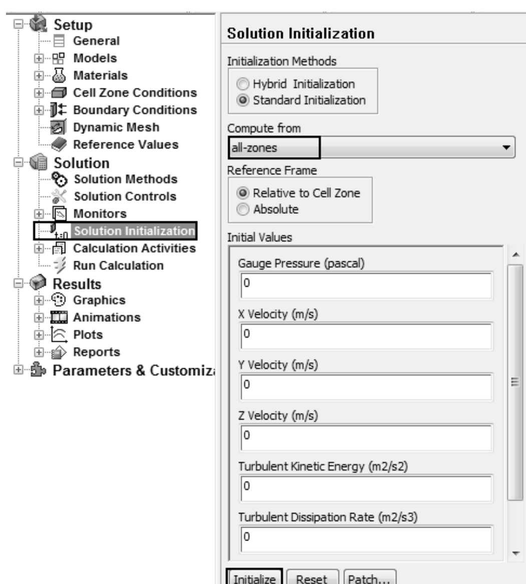


图 14-88 Solution Initialization 设置

Step38：双击 Solution 下的 Run Calculation 选项，在中间出现的如图 14-89 所示的 Run Calculation 详细设置面板中作如下设置：在 Number of Iterations 栏输入中 500；单击 Calculate 按钮进行计算。



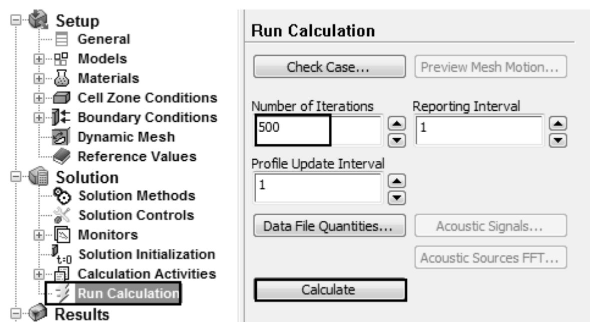


图 14-89 Run Calculation 设置

Step39：此时程序将开始计算，计算完成后弹出图 14-90 所示的 Information 提示框，表示计算完成。

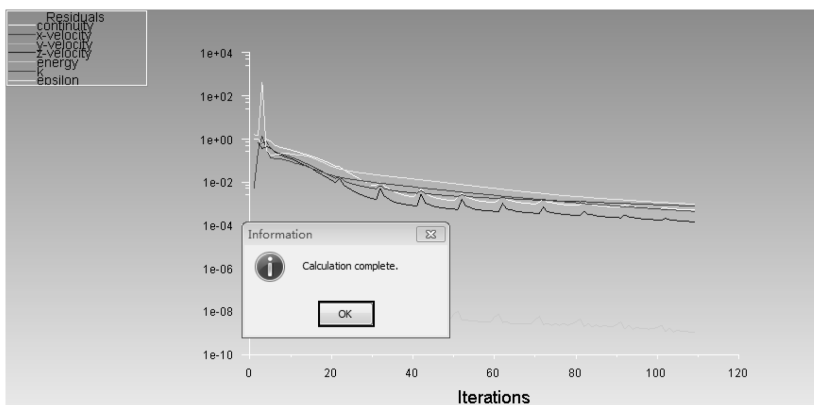


图 14-90 提示框

Step40：选择 Results 下面的 Graphics→Contours 选项，在弹出的如图 14-91 所示的 Contours 详细设置对话框中作如下设置：在 Contours of 栏中选择 Velocity 选项；在 Surfaces 栏中选择所有带 Selection 字样的选项，单击 Display 按钮。

Step41：此时将显示图 14-92 所示的 GIS 内部空气的流动云图。

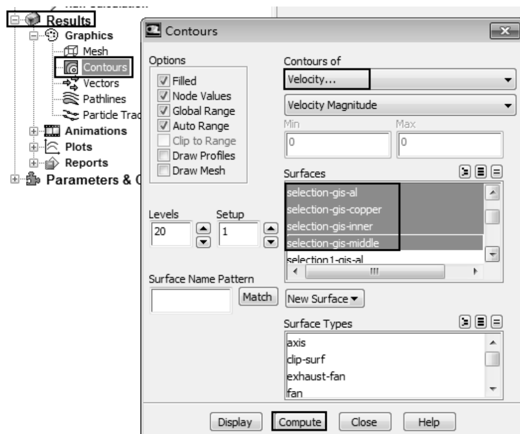


图 14-91 设置 1

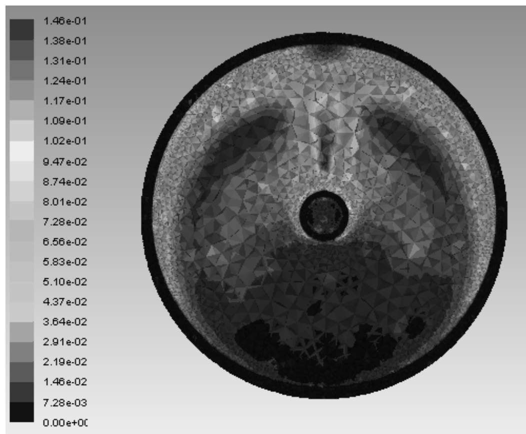


图 14-92 流动云图

Step42： 选择 Results 下面的 Graphics→Contours 选项，在弹出的如图 14-93 所示的 Contours 详细设置对话框中作如下设置：在 Contours of 栏中选择 Pressure 选项；在 Surfaces 栏中选择所有带 Selection 字样的选项，单击 Display 按钮。

Step43： 此时将显示图 14-94 所示的 GIS 温度分布云图。

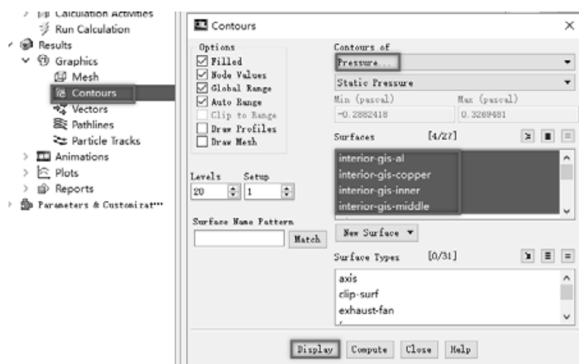


图 14-93 设置 2

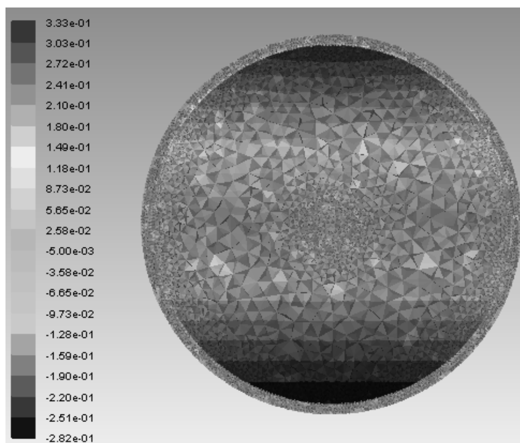
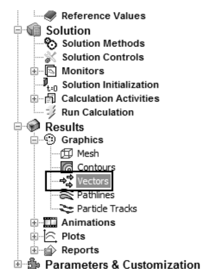
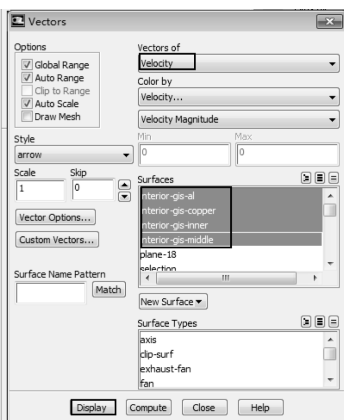


图 14-94 温度分布云图 1

Step44： 选择 Results 下面的 Graphics→Vectors 选项，在弹出的如图 14-95 所示的 Vectors 详细设置对话框中作如下设置：在 Vectors of 栏中选择 Velocity 选项；在 Surfaces 栏中选择所有带 interior 字样的选项，单击 Display 按钮。

Step45： 此时将显示图 14-96 所示的 GIS 流速矢量云图。





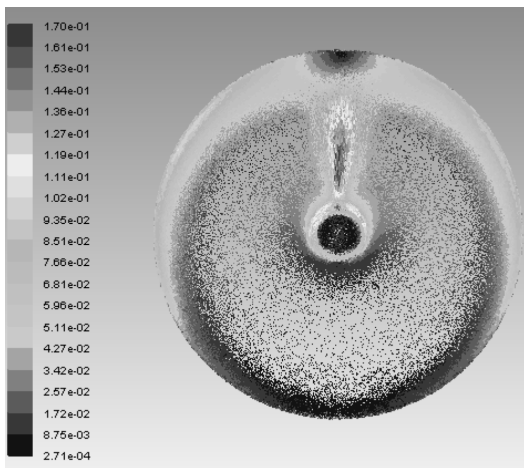


图 14-95 设置 3

图 14-96 流速矢量云图

Step46： 选择 Results 下面的 Graphics→Vectors 选项，在弹出的如图 14-97 所示的 Vectors 详细设置对话框中作如下设置：在 Vectors of 栏中选择 Velocity 选项；在 Color by 栏中选择 Temperature 选项；在 Surfaces 栏中选择所有带 interior 字样的选项，单击 Display 按钮。

Step47： 此时将显示图 14-98 所示的 GIS 温度矢量云图。

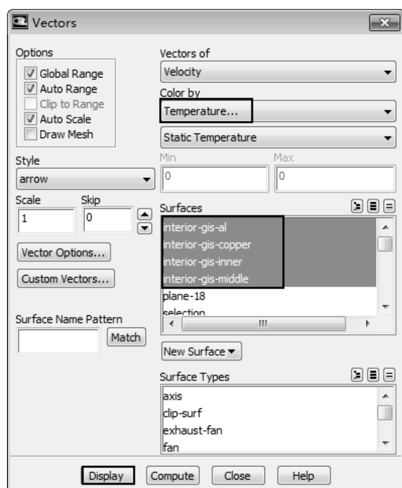


图 14-97　设置 4

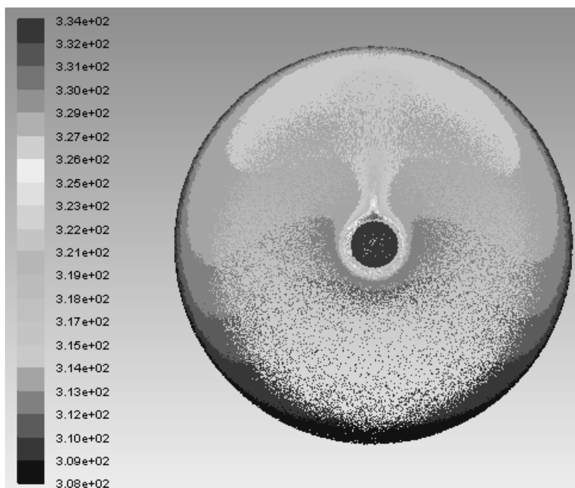


图 14-98　温度矢量云图

Step48：返回到 Workbench 平台中，双击 B6 栏，在后处理中分别添加温度分布云图选项、压力分布云图选项及流速分布矢量图选项，如图 14-99～图 14-101 所示。

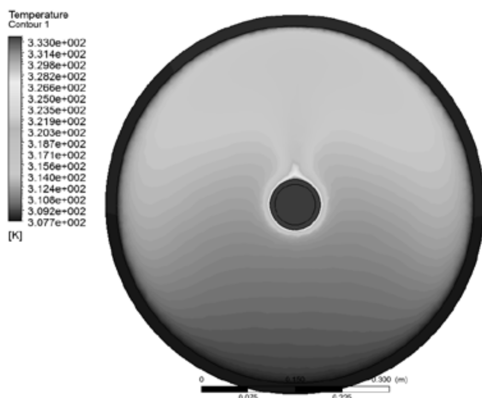


图 14-99　温度分布云图 2

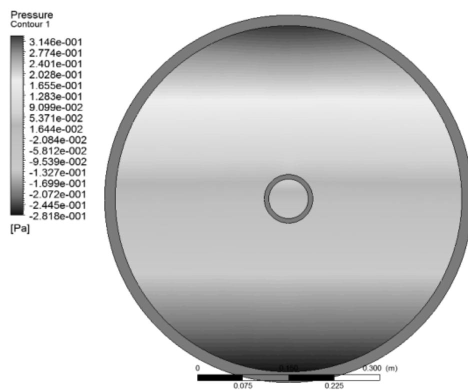


图 14-100　压力分布云图

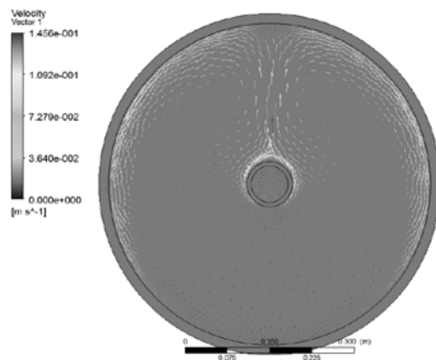


图 14-101　流速分布矢量图

Step49： 返回到 Workbench 窗口，单击 Save（保存）按钮保存文件，然后单击（关闭）按钮退出。

14.3　本章小结



本章内容主要是实例的实战操作，通过对 GIS 母线中电磁产生的热量及因浮力作用产生的温度流动效果进行了分析，通过本章的学习，读者应该理解电气设备发热、散热过程的计算与操作方法。

附录 A 常用材料的热物性表

表 A-1 各种金属的热物性值

金属	温度/℃	比热 cal/g・℃	导热系数 cal/cm・s・℃	密度ρ/(g/cm³)液相线、固相线温度/℃
纯铁	25 200 400 769 800 1000 1500	0.107 0.124 0.145 0.358 0.230 0.148 0.180	0.192 0.152 0.120 0.074 0.071 0.070 0.032	(=7.88(20(C) =7.3(1500(C) =7.0(1600(C)
镇静钢 (C0.08%)	0 200 400 800 1200	0.112 0.124 0.142 0.230 0.158	0.142 0.128 0.107 0.068 0.071	(=7.86(15(C)
软钢 (C0.23%)	0 200 400 800 1200	0.112 0.124 0.142 0.228 0.158	0.124 0.116 0.102 0.062 0.071	(=7.86(15(C)
碳素结构钢 (S35C)	25 200 400 800	0.111 0.125 0.134 0.285	0.103 0.095 0.079 0.078	
中碳钢 (C0.4%)	0 200 400 800 1200	0.112 0.122 0.140 0.148 0.156	0.124 0.115 0.100 0.059 0.071	(=7.85(15(C)
共析钢 (C0.8%)	0 200 400 800 1200	0.108 0.128 0.144 0.146 0.160	0.119 0.108 0.091 0.058 0.072	(=7.85(15(C)
工具钢 (C1.2%)	0 200 400 800 1200	0.108 0.130 0.142 0.156 0.156	0.103 0.102 0.089 0.057 0.068	(=7.83(15(C)
Si2%钢	0 200 400 800 1200	0.120 0.126 0.144 0.326 0.160	0.060 0.072 0.074 0.060 0.070	(=7.73(15(C) Ts=1488 TL=1497
Cr1%钢	20 200 400 800 1200	0.114 0.124 0.142 0.206 0.146	 0.106 0.092 0.062 0.072	(=7.84(15(C) TS=1420 TL=1520
不锈钢 (AISI 420)	20 200 400 800 1200	0.114 0.119 0.146 0.214 0.136	0.053 0.055 0.058 0.064 0.069	(=7.7(15(C) 13.1Cr,0.5Ni TS=1399 TL=1454

（续）

金属	温度/℃	比热 cal/g・℃	导热系数 cal/cm・s・℃	密度ρ/(g/cm^3)液相线、固相线温度/℃
不锈钢 （AISI 304）	0 200 400 800 1200	0.118 0.128 0.136 0.154 0.160	0.035 0.043 0.050 0.063 0.076	18～20Cr,8～12Ni TS=1399 TL=1454
过共晶 灰口铸铁	20 200 400 800 900	（0.128） （0.134） （0.140） （0.168） （0.173）	0.154 0.124 0.094 0.071 0.053	（=7.0（15（C） 比热相对于 普通铸铁
共晶灰口铸铁	20 200 400 800 1200		0.186 0.141 0.104 0.070 0.036	
球墨铸铁	20 200 400 800 1000	0.119	0.101 0.087 0.072 0.051 0.041	(=7.1(15(C)

表 A-2　各种合金的热物性值

金属	温度/℃	比热 cal/g・℃	导热系数 cal/cm・s・℃	密度ρ/(g/cm^3)液相线、固相线温度/℃
白口铸铁	20 200 400 800 1200		0.045 0.051 0.053 0.047 0.048	ρ=7.5～7.8(15°C)
纯铜	20 200 600 1000 1200	0.092 0.093 0.106 0.115	0.956 0.931 0.874 0.803	ρ=8.92 T_S=T_L=1083
Cu90%～Al10%	20 200 600 1000	0.105 0.111 0.124 0.136	0.122 0.156 0.233 0.310	T_S=1030 T_L=1042
Cu70%～Zn30%	20 200 600 900	0.094 0.100 0.113 0.123	0.267 0.349 0.359 0.367	T_S=915 T_L=955
Cu60%～Zn40%	20 200 600 900	0.092 0.097 0.108 0.116	0.302 0.346 0.361 0.334	T_S=900 T_L=905
Cu70%～Ni30%	20 200 600 1000	0.093 0.101 0.112 0.123	0.069 0.088 0.130 0.172	T_S=1170 T_L=1240
Cu60%～Ni40%	20 200 600 1000 1200	0.101 0.105 0.115 0.125 0.130	0.056 0.074 0.113 0.152 0.172	T_S=1227 T_L=1280
纯铝	20 200 500 660	0.215 0.235 0.268 0.286	0.565 0.570 0.529 0.508	ρs=2.70(15°C) T_S=T_M=660.2
Al-Cu4.5%	20 200 500	0.210 0.229 0.261	0.449 0.449 0.461	T_S=502 T_L=638

（续）

金属	温度/℃	比热 cal/g·℃	导热系数 cal/cm·s·℃	密度ρ/(g/cm³)液相线、固相线温度/℃
Al～Mg8%	20 200 400 500	0.218 0.238 0.260 0.271	0.199 0.286 0.382 0.431	T_S=540 T_L=625
纯镁	20 200 400 650	0.246 0.263 0.288 0.325	0.373 0.362 0.353 0.346	ρs=1.74 T_L=T_S=651
Mg94.7～Zn4.6～Zr0.7 (相当于 MC6)	20 200 400 549	0.242 0.264 0.303 0.341	0.261 0.296 0.319 0.324	T_S=549 T_L=641
Mg90.2～Al9～Zn0.6～Mn0.2 (相当于 MC2)	20 200 400 468	0.235 0.261 0.291 0.300	0.051 0.056 0.062 0.063	T_S=468 T_L=616
Inconel X(73Ni,15Cr,7Fe,2.5Ti,1Nb)	20 200 600 1000	0.103 0.115 0.133 0.197	0.028 0.035 0.052 0.069	ρs=6.09 T_S=1395 T_L=1427
耐盐酸镍基合金 C	600 1000 1200	0.126 0.153 0.167	0.046 0.070 0.074	T_S=1270 T_L=1305

表 A-3　典型金属材料的常温密度

材质	密度/(g/cm³)	材质	密度/(g/cm³)	材质	密度/(g/cm³)
钢 碳素钢 不锈钢 高速钢	7.80 7.90 8.20～8.80	灰口铸铁 (中碳，铁素体基体) 可锻铸铁	7.25 7.27	铝合金 铝硅合金 硬铝 ADC10	2.60 2.80 2.71
铸铁 灰口铸铁 (高碳，铁素体基体) 球墨铸铁	8.80 7.10	铜合金 7-3　黄铜 6-4　黄铜 高强度黄铜	8.50 8.40 8.30	锌合金 ZDC2	6.60
				镁合金	1.80

表 A-4　典型液体金属的物性值

物性值	低合金铸钢(1600°)①	普通铸铁(1400°C)①	纯铝(700°C)①	纯铜(1100°C) ①	纯镁(700°C)①
液相线温度/℃	1400～1530	1123～1130	660	1083	851
密度/(g/cm³)	6.80～7.00	6.50～6.90	2.35	1.90	1.58
比热	0.15	0.22	0.26	0.12	0.29
导热系数	40 (纯铁)	--	100	170	80
凝固潜热/(J·g⁻¹)	251～268	209～268	394	204	230
凝固收缩率/(%)	3～4	-0.8～0.5	6.5	4.2	4.2
表面张力	1700	920	900	1300	560
粘度/mPa·s	6	5～8	1.1～2	4	1.2
热辐射系数	0.3～0.45 (全辐射系数)	0.3～0.45 (全辐射系数)	0.12 (相对 0.65μm 的波长)	0.1 (相对 0.66μm 的波长)	--

① 表示所给物性值的温度条件。

表 A-5 其他物质的热物性值

物质名	温度/℃	比热	导热系数	密度ρ/(g/cm³) 粘度μ/(Pa・s),其他
		$cal/g^{-1}.°C^{-1}$	$cal/cm^{-1}s^{-1}°C^{-1}$	
干燥空气	20	0.24	6.2×10^{-5}	$\rho=1.21\times10^{-3}$ $\mu=1.8\times10^{-5}$
氮	20	0.25	7.6×10^{-5}	$\rho=0.88\times10^{-3}$ $\mu=2.5\times10^{-5}$
氢	20	3.39	4.2×10^{-4}	$\rho=0.085\times10^{-3}$ $\mu=0.87\times10^{-5}$
水	20	1.0	1.4×10^{-3}	ρ=1.0, $\mu=1.0\times10^{-3}$
汽缸油	20	0.45	3.6×10^{-4}	ρ=0.89, μ=0.8
石膏	20	0.15～0.2	1.45×10^{-3}	ρ=0.8～1.5
石棉	100	0.195	4.5×10^{-4}	ρ=0.58
混凝土	20	0.21	$(2\sim3)\times10^{-3}$	ρ=1.9～2.3
玻璃纤维	20	0.16	9.6×10^{-5}	ρ=0.2
砂岩	20	0.17	4.1×10^{-3}	ρ=2.2
杉树条	23	0.072	2.6×10^{-4}	ρ=0.42
硅砖	500	0.23	3×10^{-3}	ρ=1.7
锆砖	500	0.14	6×10^{-3}	ρ=3.7
镁砖	1000	0.3	$(1.4\sim8.8)\times10^{-3}$	ρ=2.53
渣	1000～1500	0.263	1.7×10^{-3}	CaO35%−−$SiO_2$45%−−$Al_2O_3$20%
渣	1000～1500	0.41	1.2×10^{-3}	CaO50%−−$SiO_2$35%−−$Al_2O_3$15%

表 A-6 合金的密度、潜热

合金	ρ_s(20℃)/ (kg/m³)	$\rho_s(T_s)$/ (kg/m³)	L/ (kJ/kg)
1%Cr 钢	7840	−−	277
1.5%Mn 钢	7850	−−	277
2%Si 钢	7730	−−	333
奥氏体不锈钢	7700	7000	294
铁素体不锈钢	8000	−−	304
0.08%C 钢	7800	7030	
0.23%C 钢	7860	7030	
0.80%C 钢	7850	6990	
1.20%C 钢	7830	6900	
白口铸铁	7650	(7000)	
灰口铸铁	7100	(6650)	
Al−4.5%Cu	2980	(2630)	−−
Al Si 7Mg	2680	(2360)	−−
Cu−30Zn	8390	(7520)	−−
Mg−3Al−1Zn−5Mn	1850	(1690)	370
Ni−15Cr−7Fe−2.5Ti−Hb −0.9Al−0.7Mn−0.4Si−0.040	6087	(5400)	

表 A-7 单位换算表

量	SI 制	CGS 制	工程制，MKH 制
密度	kg/m^3	g/cm^3	kg/m^3
	1 1000	10^{-3} 1	1 1000
力	N	dyn	kgf
	1 9.80665	10^5 9.80665×10^5	1/9.80665 1
压力	Pa	dyn/cm^2	kgf/cm^2
	1 0.0980665×10^6	10 0.980665×10^6	1.01972×10^{-6} 1
热量	J	cal	kcal
	1 4.18605	0.238889 1	0.238889×10^{-3} 10^{-3}
比热	kJ/(kg・K)	cal/(g・°C)	kcal/(kg・°C)
	1 4.18605	0.238889 1	0.238889 1
比热流量	W/m^2	$cal/(cm^2$・s)	$kcal/(m^2$・h)
	1 4.18605×10^4	2.38889×10^{-5} 1	0.86 3.6×10^4
导热系数	W/(m・K)	cal/(cm・s・°C)	kcal/(m・h°C)
	1 418.605	2.38889×10^{-3} 1	0.86 3.60
热传达系数	$W/(m^2$・K)	$cal/(cm^2$・s・°C)	$kcal/(m^2$・h・°C)
	1 4.18605×10^4	2.38889×10^{-5} 1	0.86 3.6×10^4
粘度	Pa・s	cP(10^{-2}dyn・s/cm^2)	kgf・s/m^2
	1 0.001	1000 1	0.101973 0.101973×10^{-3}
表面张力	N/m	dyn/cm	kgf/m
	1 0.001	10^3 1	0.101973 0.101973×10^{-3}



附录 B　空气热物性参数

表 **B-1**　大气压 **P=760mmHg** 时的干燥空气的物理参数

t/℃	ρ /（kg/m^3）	C_p / [J/(kg・℃)]	$\lambda\times10^2$ / [W/(m・℃)]	$\mu\times10^5$ / [kg/(m・s)]	$\nu\times10^6$ / (m^2/s)	P_r
−50	1.584	1013	2.03	1.49	9.23	0.728
−40	1.515	1013	2.12	1.55	10.04	0.728
−30	1.453	1013	2.20	1.60	10.80	0.723
−20	1.395	1009	2.28	1.65	12.79	0.716
−10	1.342	1009	2.36	1.70	12.43	0.712
0	1.293	1005	2.44	1.75	13.28	0.707
10	1.247	1005	2.51	1.80	14.16	0.705
20	1.205	1005	2.59	1.85	15.06	0.703
30	1.165	1005	2.67	1.90	16.00	0.701
40	1.128	1005	2.76	1.95	16.96	0.699
50	1.093	1005	2.83	2.00	17.95	0.698
60	1.060	1005	2.90	2.05	18.97	0.696
70	1.029	1009	2.97	2.10	20.02	0.694
80	1.000	1009	3.02	2.15	21.09	0.692
90	0.972	1009	3.13	2.19	22.10	0.690
100	0.946	1009	3.21	2.23	23.13	0.688
120	0.898	1009	3.34	2.33	25.45	0.686
140	0.854	1013	3.49	2.42	27.80	0.684
160	0.815	1017	3.64	2.50	30.09	0.682
180	0.779	1022	3.78	2.58	32.49	0.681
200	0.746	1026	3.93	2.65	34.85	0.680
250	0.674	1038	4.27	2.79	40.61	0.677
300	0.615	1047	4.60	3.03	48.33	0.674
350	0.566	1060	4.91	3.20	55.46	0.676
400	0.524	1068	5.21	3.37	63.09	0.678

表 B-2　在一个大气压或饱和线上水的物理参数

t/℃	ρ /（kg/m^3）	C_p / [J/(kg・℃)]	$\lambda\times10^2$ / [W/(m・℃)]	$\mu\times10^5$ / [kg/(m・s)]	$\nu\times10^6$ / (m^2/s)	P_r
0	999.9	4212	55.1	182.3	1.789	13.67
5	999.8	4204	56.3	157.8	1.547	11.61
10	999.7	4191	57.4	133.1	1.306	9.52
15	999.0	4187	58.7	117.5	1.136	8.30
20	998.2	4183	59.9	102.4	1.006	7.02
25	996.9	4179	60.8	90.8	0.895	6.28
30	995.7	4179	61.7	81.7	0.805	5.42
35	994.0	4179	62.6	73.7	0.723	4.90
40	992.2	4179	63.4	66.6	0.659	4.31
45	990.1	4179	64.1	61.0	0.602	3.93
50	988.1	4179	64.8	56.0	0.556	3.54
55	985.6	4179	65.3	51.7	0.516	3.28
60	983.2	4183	65.9	47.9	0.478	2.98
65	980.5	4183	66.4	44.3	0.445	2.78
70	977.8	4187	66.7	40.7	0.415	2.55
75	974.8	4191	67.1	38.5	0.393	2.40
80	971.8	4195	67.4	36.2	0.365	2.21
85	968.6	4204	67.8	33.8	0.348	2.09
90	965.3	4208	68.0	32.1	0.326	1.95
95	961.8	4216	68.1	30.3	0.309	1.85
100	958.4	4220	68.3	28.8	0.295	1.75
110	951.0	4233	68.5	26.4	0.272	1.60
120	943.1	4250	68.6	24.2	0.252	1.47
130	934.8	4267	68.6	22.2	0.233	1.36
140	926.1	4287	68.5	20.5	0.217	1.26
150	917.0	4313	68.4	19.0	0.203	1.17
160	907.4	4346	68.3	17.7	0.191	1.10
170	897.3	4380	67.9	16.6	0.181	1.05
180	886.9	4417	67.4	15.6	0.173	1.00
190	876.0	4459	67.0	14.7	0.165	0.96
200	863.0	4501	66.3	13.9	0.158	0.93
220	840.3	4614	64.5	12.7	0.148	0.89
240	813.6	4621	62.8	11.7	0.141	0.87
260	784.0	5049	60.5	10.8	0.135	0.87
280	750.7	5230	57.4	10.0	0.131	0.90
300	712.5	5736	54.0	9.3	0.128	0.97

参 考 文 献



[1] 章熙民，任泽霈. 传热学[M]. 4 版. 北京：中国建筑工业出版社，2001.

[2] 李鹏飞，徐敏义. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京：人民邮电出版社，2011.

[3] 孙纪宁. ANSYS CFX 对流传热数值模拟基础应用教程[M]. 北京：国防工业出版社，2010.

[4] Saeed Moaveni. 有限元分析——ANSYS 理论与应用[M]. 2 版. 王崧，译. 北京：电子工业出版社，2005.

[5] 黄志新，刘成柱. ANSYS Workbench14.0 超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2013.

[6] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[7] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.

[8] 安世亚太公司. ANSYS Workbench17.0 Help. 2016.

[9] 安世亚太公司. ANSYS Workbench 17 官方培训教程. 2016.

[10] E. M. 斯帕罗，R. D. 赛斯. 辐射传热[M]. 顾传宝，译，北京：高等教育出版社，1982.

[11] 陈礼，吴勇华. 流体力学与热工基础[M]. 北京：清华大学出版社，2002.

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆瓣网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练

ANSYS系列已出版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

- ANSYS Workbench 17.0 热力学分析实例演练
- ANSYS Workbench 17.0 结构仿真分析从入门到精通
- ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 16.1结构分析工程应用实例解析 第4版
- ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通
- ANSYS 15.0 有限元分析完全自学手册
- ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0 从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版


机械工业出版社计算机分社官方微信

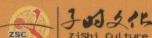
关注计算机分社官方微信，回复您购买图书书号中间的五位数字，即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

ISBN 978-7-111-56727-1

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-56727-1
策划编辑◎张淑谦
封面设计◎


51CTO.com
技术成就梦想

ISBN 978-7-111-56727-1


定价：89.00元